www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

8e JAARGANG No. 11, blz. 321-352 NOVEMBER 1946

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: HET NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

RÖNTGENDOORLICHTING MET VERGROOT BEELD

621.386.8:
616-073.755:
620.179.152

door G. C. E. BURGER, B. COMBÉE en J. H. van der TUUK.

De intrinsieke onscherpte van een doorlichtingsscherm (bijv. ca 1 mm) belemmert de waarneembaarheid van kleine contrastarme details. Door het object ver van het scherm en dicht bij het focus te plaatsen, krijgt men een vergroot doorlichtingsbeeld waarop de (constante) schermonscherpte relatief minder invloed heeft. Om te beletten, dat de bij het vergrooten sterk toenemende geometrische onscherpte het beoogde effect bederft, moeten voor het vergroot doorlichten röntgenbuizen met zeer klein focus worden gebruikt. Bij het vergrooten nemen tevens alle contrasten in het beeld aanzienlijk toe, doordat bij groote afstand tusschen object en scherm practisch geen secundaire, verstrooide straling op het scherm valt. Door de verbetering van scherpte en contrast worden zekere groepen van, voordien onzichtbare, details waarneembaar, terwijl tevens het bekijken van de groote beelden sneller gaat en minder vermoeiend is. In bepaalde gevallen gaat het vergrooten met een belangrijk verlies in (primaire) schermhelderheid gepaard. De nadeelige invloed hiervan op de waarneembaarheid der details wordt geanalyseerd. In de medische diagnostiek maakt het vergrooten een beperking van de waarnemingstijd van een patient noodig. Zoowel fantoomproeven als een klein serie-onderzoek van longpatienten hebben tot de conclusie geleid, dat het vergrooten een merkbare vooruitgang in de diagnostiek zal kunnen meebrengen. De hierbij te volgen techniek zal nog nader moeten worden uitgewerkt. In een afzonderlijk hoofdstuk wordt de constructie beschreven van de Philips röntgenbuizen, die speciaal ten behoeve van de genoemde experimenten zijn ontwikkeld. Zij werken met electrostatische focusseering en leveren twee foci naar keuze, één normaal focus van 2,0 of 1,2 mm breed en een fijn focus van 0,3 mm breed.

Onscherpte van het beeld bij doorlichten

Het schaduwbeeld dat men bij de röntgendoorlichting van een willekeurig object op het fluorescentiescherm verkrijgt, is steeds behept met een zekere onscherpte, die te wijten is aan twee oorzaken. Ten eerste is het focus van de röntgenbuis, waarvan de projecteerende stralen uitgaan, niet puntvormig. De eindige breedte f van het focus veroorzaakt een „geometrische onscherpte" O_g (halfschaduwbreedte), die blijkens *fig. 1* gegeven wordt door

$$O_g = \frac{b}{a} f, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

waarbij a en b de respectievelijke afstanden tusschen object en focus en tusschen object en scherm zijn. Ten tweede brengt het mechanisme van de opwekking van het licht in het fluorescentiescherm een vervaging van het beeld mee. Elk doorlichtingsscherm heeft hierdoor een intrinsieke onscherpte, de „schermonscherpte" O_s, welke voor een normaal goed scherm bijv. 0,6 à 1,0 mm kan bedragen. De geometrische onscherpte is meestal kleiner. In het geval bijv. van de normale longdoorlichting is $a \approx 50$ cm, $b \approx 20$ cm, en er worden foci van bijv. 1,2 mm breedte toegepast; hiervoor wordt $O_g \approx 0{,}5$ mm.

Zoowel in het materiaalonderzoek als in de medische diagnostiek wordt bij het doorlichten er naar gestreefd zeer kleine voorwerpen, veelal met gering contrast, te kunnen waarnemen (gaatjes, scheurtjes, montagefoutjes in het werkstuk; ziektehaarden in de long, zweertjes in de maag, enz.). De onscherpte van het beeld zal hierbij een handicap zijn. Wij zullen dit nog nader toelichten, maar kunnen alvast globaal zeggen, dat de waarneembaarheid van een detail met gering contrast twijfelachtig zal worden, zoodra het detail niet grooter dan de onscherpte van het beeld is. Bij de bovengenoemde getalwaarden voor de onscherpte, zouden dus allerlei (soms belangrijke) details, kleiner dan ongeveer 1 mm, aan de waarneming ontsnappen.

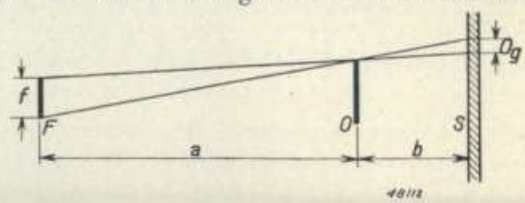


Fig. 1. Tengevolge van de eindige breedte f van het focus (F) krijgt het röntgenschaduwbeeld van het object (O) op het doorlichtingsscherm (S) een geometrische onscherpte O_g.

Principe van het vergroot doorlichten

Het spreekt vanzelf, dat men zich slechts noode bij een dergelijke beperking zal neerleggen. Nu

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bestaat er een in principe zeer eenvoudige methode om de zichtbaarheid van kleine details te verbeteren, nl. het doorlichten met vergroot beeld. Hiertoe wijzigt men de opstelling in fig. 1, in dier voege dat b eenige malen grooter wordt dan a; zie *fig. 2*. Uit de figuur leest men af, dat het object dan met een factor

$$v = \frac{b+a}{a} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

vergroot op het scherm wordt afgebeeld. Aangezien alle details in dezelfde verhouding worden vergroot (of, bij een dik object, toch ongeveer in dezelfde verhouding), terwijl de intrinsieke onscherpte van het scherm onveranderd blijft, hebben kleine details thans een grootere kans boven de schermonscherpte uit te komen. Weliswaar zou bij de bedoelde verandering van de afstandsverhouding b/a de geometrische onscherpte sterk toenemen (verg. 1)

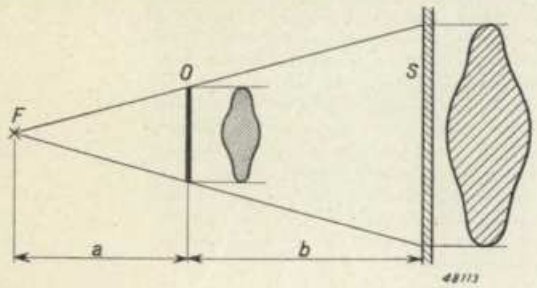


Fig. 2. Door de afstand b tusschen object (O) en scherm (S) voldoende groot te maken ten opzichte van de afstand a tusschen object en focus (F) kan een meer of minder sterk vergroot doorlichtingsbeeld van het object worden verkregen.

en daardoor roet in het eten gooien. Men kan echter de toeneming van de factor b/a in verg. (1) compenseeren door de focusbreedte f overeenkomstig kleiner te maken. Voor de practische toepassing van het vergroot doorlichten zijn derhalve speciale röntgenbuizen met een zeer klein focus gewenscht.

We zullen in hetgeen volgt deze globale voorstelling door een meer kwantitatieve formuleering vervangen en ook de invloed van verscheidene andere factoren bespreken die bij het vergroot doorlichten in het geding komen. Het zal daarbij blijken, dat de situatie voor het materiaalonderzoek eenigszins verschilt van die voor de medische diagnostiek. Op de mogelijkheden van een medische toepassing, die in de laatste jaren door ons nader onder oogen zijn gezien, zal wat uitvoeriger worden ingegaan. Tevens zullen de door Philips speciaal met het oog op de vergrootingstechniek ontwikkelde röntgenbuizen worden beschreven.

De door vergrooten bereikbare verbetering

De critische detailgrootte

Dat een grooter en scherper beeld op zichzelf prettiger is en meer zekerheid in het beoordeelen zal veroorloven, behoeft geen betoog. Maar men kan zich afvragen, of men in het vergroote, relatief scherpere beeld inderdaad details zal kunnen waarnemen die voordien onzichtbaar waren. Om deze vraag te beantwoorden, is het noodzakelijk eerst de nadeelige invloed der onscherpte nader te beschouwen.

Wij nemen om te beginnen het geval, dat de afstand b zeer klein is; er wordt dus geen vergrooting toegepast ($v \approx 1$) en we onderstellen ook een puntvormig focus, zoodat de geometrische onscherpte nul is. Buiten de schaduw van het waar te nemen detail zij de schermhelderheid H_2, midden in de schaduw H_1 (zie *fig. 3a*). Aan de rand van de schaduw daalt de helderheid tengevolge van de schermonscherpte niet abrupt van de waarde H_2 tot de waarde H_1, maar er is een overgangsgebied ter breedte O_s, waarin de helderheid geleidelijk van H_2 tot H_1 verloopt (eenvoudigheidshalve beschouwen we dit verloop als lineair). Voor de waarneembaarheid van het in fig. 3*a* geteekende detail, welks diameter d grooter dan de schermonscherpte O_s is, heeft deze geleidelijke helderheidsovergang geen belangrijk nadeel tengevolge. Indien het contrast tusschen H_1 en H_2 gelijk aan of grooter dan het minimum contrast is dat de waarnemer, bij de met d overeenkomende gezichtshoek, nog juist onderscheiden kan, zal het detail worden waargenomen, ondanks de onscherpte [1]).

Anders wordt de zaak indien het detail kleiner is dan de schermonscherpte. In fig. 3*b* ziet men, dat de gebieden van de helderheidsovergang aan tegenoverliggende randen thans ten deele over elkaar vallen. De helderheid achter het detail daalt nergens tot de lage waarde H_1, dwz. de schermonscherpte heeft een vermindering van het contrast tengevolge. Indien dus een detail ter grootte $d < O_s$ zonder de schermonscherpte nog juist voldoende contrast zou veroorzaken om waargenomen te worden, dan zal het tengevolge van de contrastvermindering door de onscherpte beneden de maat blijven. We kunnen in dit geval O_s de critische detailgrootte noemen.

We beschouwen nu ditzelfde geval bij doorlichten met vergrooting ($v > 1$). Het schaduwbeeld van het detail wordt v maal zoo groot, de constant blijvende schermonscherpte O_s kan nu pas een contrastvermindering veroorzaken, indien $v \cdot d < O_s$, dwz. bij

[1]) Met afnemende gezichtshoek stijgt de waarde van het minimale waarneembare contrast. Door de uit fig. 3*a* blijkende besnoeiing van het gebied met het volle contrast van een detail (helderheidsverschil H_2—H_1) wordt dus de waarneembaarheid wel iets benadeeld. Ook is de contrastindruk bij een geleidelijke helderheidsovergang $H_2 \rightarrow H_1$ wellicht kleiner dan bij een abrupte overgang.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

v maal kleinere details dan voordien. Slechts v maal kleinere details loopen dus kans aan de waarneming te ontsnappen. Dit is het effect waarom het bij het vergrooten begonnen is.

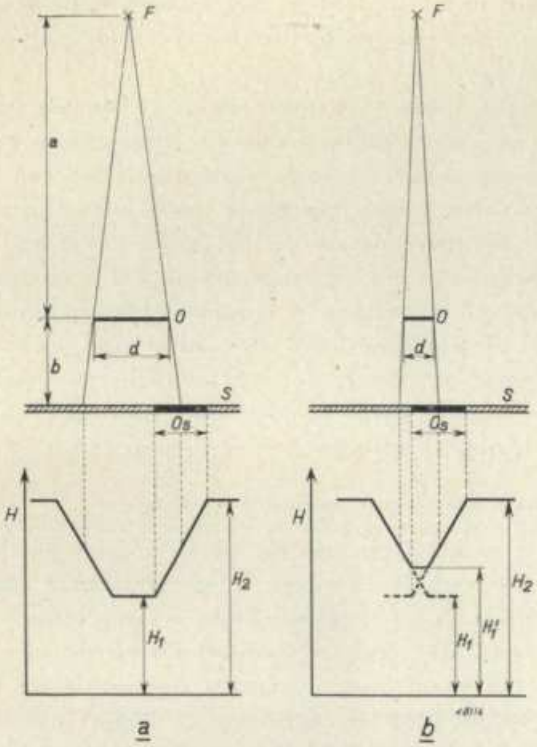


Fig. 3. Invloed van de intrinsieke schermonscherpte O_s op de afbeelding van een detail ter grootte d. Het focus is puntvormig ondersteld, zoodat de geometrische onscherpte $O_g = 0$. De afstand b is nog zoo klein ondersteld, dat geen noemenswaardige vergrooting optreedt ($v \approx 1$). Onderaan is de helderheid H op het doorlichtingsscherm uitgezet als functie van de plaats langs een doorsnede.
a) Groot detail, $d > O_s$.
b) Klein detail, $d < O_s$. De onscherpte veroorzaakt hier een vermindering van het contrast; $d = O_s$ is in dit geval de „critische detailgrootte".

Het effect wordt ten deele te niet gedaan doordat bij het vergrooten de totale onscherpte toch toeneemt; zooals we reeds aanstipten, komt nl. nu de geometrische onscherpte naar voren. Onderstellen we even, dat alleen de geometrische onscherpte O_g aanwezig is ($O_s = 0$), dan wordt de situatie voor een groot en een klein detail door *fig. 4a* resp. *b* weergegeven. O_g vermindert op geheel dezelfde wijze het contrast bij kleine details, als hierboven voor de schermonscherpte O_s werd uiteengezet. „Contrastvermindering" is thans slechts een andere uitdrukking voor het eenvoudige feit, dat het doorlichtscherm niet meer door de kernschaduw van het detail getroffen wordt (zie fig. 4*b*). De voorwaarde voor contrastvermindering is, analoog als hierboven, $v \cdot d < O_g$ en aangezien

$$O_g = (v-1) \cdot f \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

(zie verg. 1 en 2), wordt de waarneembaarheid benadeeld voor details met

$$d < f\left(1 - \frac{1}{v}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Zou men dus zeer sterk vergrooten ($v \gg 1$), zoodat de schermonscherpte verwaarloosd kan worden naast de geometrische onscherpte, dan wordt blijkens verg. (4) de critische detailgrootte eenvoudig gelijk aan de focusbreedte. Hieruit blijkt ten duidelijkste het belang van een zoo klein mogelijk focus voor de vergrootingstechniek.

Het gelijktijdig optreden van een geometrische en een schermonscherpte resulteert in een totale onscherpte O_t die bij benadering kan worden voorgesteld [2]) door

$$O_t = \sqrt{O_g^2 + O_s^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Contrastvermindering ontstaat bij $v \cdot d < O_t$, dus is de critische detailgrootte in het algemeene geval:

$$d = \frac{1}{v}\sqrt{(v-1)^2 f^2 + O_s^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

of, als we de formule in dimensielooze vorm schrijven:

$$\frac{d}{O_s} = \frac{1}{v}\sqrt{(v-1)^2\left(\frac{f}{O_s}\right)^2 + 1} \quad . \quad . \quad (7)$$

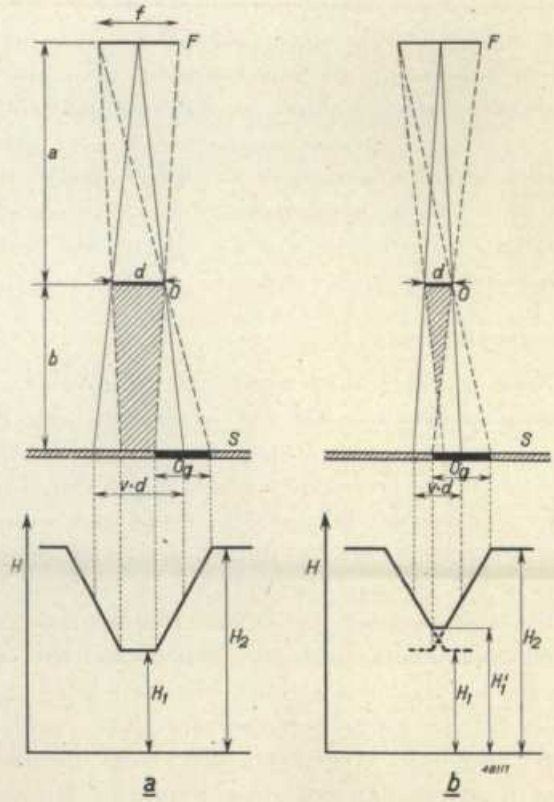


Fig. 4. Invloed van de geometrische onscherpte O_g. Er is ondersteld $O_s = 0$. De figuur is analoog aan fig. 3.
a) Groot detail, $d > O_g$.
b) Klein detail, $d < O_g$. Er treedt een contrastvermindering op.

[2]) R. R. Newell, Brit. J. Radiology **30**, 493, 1938.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

In *fig. 5* is dit verband grafisch voorgesteld. De verhouding d/O_s is uitgezet als functie van de vergrooting v, voor verschillende waarden van de parameter f/O_s. Men ziet, dat bij voldoend klein focus met toenemende vergrooting de critische detailgrootte steeds kleiner wordt, maar tevens dat

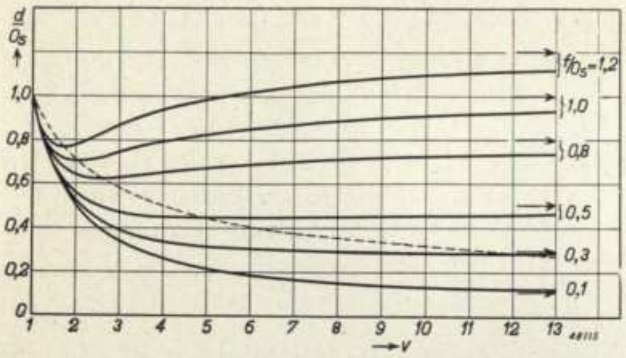


Fig. 5. Bij gelijktijdige aanwezigheid van een schermonscherpte O_s en een geometrische onscherpte (focusbreedte f) wordt de critische detailgrootte d, waarbeneden een contrastvermindering door de onscherpte ontstaat, gegeven door verg. (7). De verhouding d/O_s is hier volgens deze vergelijking uitgezet als functie van de vergrootingsfactor v, met het quotient f/O_s als parameter. Elke kromme doorloopt een minimum, bij een vergrootingsfactor $v_m = 1 + (O_s/f)^2$; de hoogte van deze minima wordt gegeven door $(d/O_s)_{min} = 1/v_m$ (gestippelde kromme). Bij zeer kleine foci, bijv. voor $f/O_s = 0{,}3$ wordt echter reeds bij een vergrooting $v \approx 4$ practisch de geheele theoretisch mogelijke winst behaald.

deze daling beperkt wordt door de focusbreedte f. Bij de waarde $f = 0{,}3$ mm, die in de hieronder te beschrijven röntgenbuizen is verwezenlijkt, en bij $O_s = 1{,}0$ mm, zal men practisch niet meer dan 4 maal vergrooten, aangezien de verdere daling van d dan niet meer noemenswaard is. De critische detailgrootte is hierbij $d = 1/3$ mm, terwijl zonder vergrooten $d = O_s = 1$ mm is!

De strooistraling

Behalve het terugdringen van de invloed der schermonscherpte heeft het vergrooten nog een andere gunstige uitwerking, die geheel los staat van de tot dusverre gegeven beschouwingen. Naarmate de afstand (b) tusschen object en doorlichtingsscherm grooter wordt gekozen, valt op het scherm een geringer percentage van de door het object verstrooide, secundaire röntgenstraling [3]). Deze strooistraling legt een gelijkmatige, alle contrasten verminderende sluier over het beeld — een effect dat dus bij het vergrooten zwakker wordt of zelfs practisch verdwijnt. Men boekt daardoor over de geheele linie een winst in contrast. Hoe aanzienlijk de toeneming der contrasten zijn kan, volgt hieruit, dat bijv. bij een longdoorlichting de gestrooide straling dezelfde intensiteit als de primaire straling kan bezitten, bij een buikdoorlichting zelfs een drie of vier maal zoo groote intensiteit [3]).

Het effect van de toeneming der contrasten wordt nog verhoogd door het feit, dat bij het vergrooten de gezichtshoeken, waaronder alle details van het object worden gezien, evenredig toenemen. Voor details met een grootere gezichtshoek bezit nl. een waarnemer een grootere contrastgevoeligheid (verg. noot [1])).

In *fig. 6* zijn twee foto's (*b* en *c*) van het beeld van een object (*a*) op het doorlichtingsscherm weergegeven, zonder en met vergrooting. Men ziet het naar voren komen van kleine, eerst niet of nauwelijks zichtbare details en het grooter worden der contrasten in het vergroote beeld. Ter vergelijking is ook een reproductie weergegeven (*d*) van het normale doorlichtingsbeeld dat naderhand optisch is vergroot. Daar de schermonscherpte hierbij meevergroot wordt en de strooistralensluier aanwezig blijft, heeft men geen verbetering.

Gemak van de waarneming

De vergelijking van fig. 6*b* en *c* geeft ook een indruk van de prettiger en gemakkelijker waarneming van het vergroote beeld, waarop reeds werd gewezen. Het tastbare voordeel dat hieruit voor de practijk voortvloeit, is, dat het zich realiseeren van de waarneming (de apperceptie) vlugger geschiedt en minder gauw aanleiding geeft tot vermoeienis.

De schermhelderheid

Invloed op de verkregen verbetering

Het zou voorbarig zijn, als men uit het bovenstaande zou willen besluiten, dat het vergrooten in alle gevallen (bij voldoend klein focus) nut zal opleveren. We hebben nl. nog buiten beschouwing gelaten het feit, dat bij het vergrooten de helderheid van het beeld op het doorlichtingsscherm kan verminderen.

We moeten hierbij onderscheid maken tusschen de helderheidsbijdrage der primaire (het beeld vormende) en der secundaire (verstrooide) röntgenstraling. De secundaire helderheidsbijdrage daalt bij het vergrooten in elk geval. Dit maakt, dat allerlei nog te bespreken physiologische factoren eenigszins ten nadeele worden beïnvloed; maar over het geheel kan het verdwijnen der gestrooide straling alleen maar gunstig zijn. Echter ook de primaire helderheidsbijdrage kan door het vergrooten aanzienlijk achteruitgaan. We zullen aanstonds zien, dat dit in het materiaalonderzoek heel vaak het geval is, terwijl het in de medische diag-

[3]) Zie bijv. W. J. Oosterkamp, Bestrijding van de verstrooide straling in het medische röntgenbeeld, Philips techn. T. 8, 183, 1946 (nr. 6).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

nostiek in het algemeen niet behoeft op te treden.

Bij dalende schermhelderheid gaan de gezichtsscherpte en de contrastgevoeligheid van den waarnemer achteruit. Het voordeel van de toeneming aller contrasten door het vergrooten (inclusief de vermelde hoogere contrastgevoeligheid tengevolge van de grootere gezichtshoeken) wordt door een vermindering van de contrastgevoeligheid ten deele weer opgeheven. Wat de onscherpte betreft, de hierdoor veroorzaakte critische detailgrootte hangt niet van de helderheid af, maar de contrastvermindering bij details met afmetingen kleiner dan de critische grootte wordt, indien 's waarnemers contrastgevoeligheid daalt, reeds bij grootere contrasten funest, zoodat een grootere groep van details in de niet meer waarneembare categorie valt. Ook een deel van de winst die het vergrooten speciaal voor de waarneming van kleine contrastarme details oplevert, gaat aldus weer verloren.

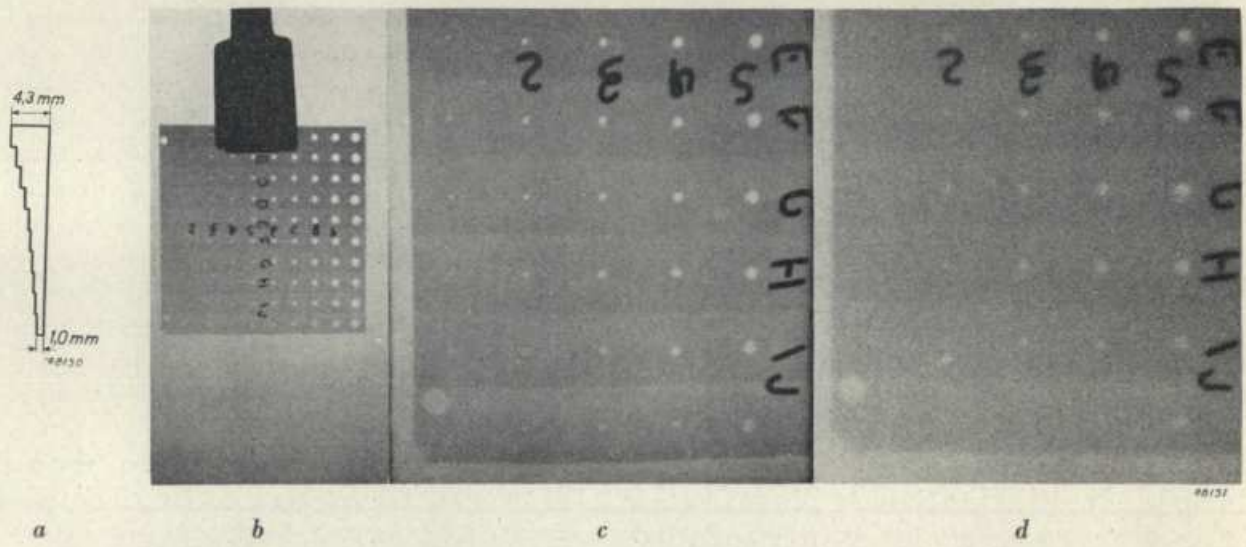


Fig. 6. Normaal (*b*) en viervoudig vergroot (*c*) doorlichtingsbeeld van een testobject (*a*), bestaande uit een aluminiumplaat met trapsgewijze varieerende dikte, met in elke trap een reeks gaten met verschillende diameters. *d*) Zelfde beeld als in (*b*), dus bij normaal doorlichten verkregen, maar op vier maal grootere schaal dan (*b*) gereproduceerd; geen noemenswaardige verbetering ten opzichte van (*b*). (Dat men op de reproducties in dit tijdschrift toch wat meer details in *d* dan in *b* kan onderscheiden, is te wijten aan de nieuwe „onscherpte", die door het raster van de autotypie wordt geïntroduceerd: kleine details verdrinken eerder in dit raster dan groote.)

Behalve aan de contrastarme (kleine en groote) details, waarvoor alle bovenstaande beschouwingen zijn gehouden, moeten we ook aandacht besteden aan kleine contrastrijke details. Behalve het voordeel van de over het geheel scherpere weergave verschaft het vergrooten voor deze details geen verbetering in de al- of niet-waarneembaarheid. Een met het vergrooten gepaard gaand helderheidsverlies zal de waarneembaarheid van de bedoelde details eventueel zelfs slechter maken. Dit is als volgt in te zien.

De waarneembaarheid der contrastrijke details wordt door de gezichtsscherpte beperkt, dwz. door de minimale gezichtshoek α_{min} waaronder de waarnemer een detail nog juist kan onderscheiden. Daalt de helderheid door het vergrooten, dan stijgt α_{min}. Tevens echter neemt de gezichtshoek a van het detail evenredig met de vergrootingsfactor v toe. De waarneembaarheid wordt benadeeld indien α_{min} sneller dan evenredig met v stijgt. Het verband tusschen α_{min} en de helderheid is door vele onderzoekingen bekend. Het verband tusschen de helderheid en v kan, zooals we reeds aanstipten, zeer verschillend zijn. Onderstellen we, om de gedachte te bepalen, een verloop van de schermhelderheid evenredig met $1/v^2$, dan blijkt, dat, zoolang de helderheid boven een bepaalde grens blijft, de toeneming van a het wint, zoodat dan het vergrooten de „effectieve" gezichtsscherpte verbetert. Bij welke vergrooting men aan deze helderheidsgrens toe komt, hangt uiteraard af van de beginhelderheid (voor $v = 1$) en deze op haar beurt is geheel verschillend naar gelang van de aard en de dikte van het te doorstralen object. Vergrooten boven een zekere factor v, die nog van het object afhangt, zal dus de waarneming van de zeer kleine contrastrijke details benadeelen, al wordt de zichtbaarheid der contrastarme details verbeterd. Dit feit kan voor het materiaalonderzoek van belang zijn.

Schermhelderheid en methode van vergrooten

Uitgaande van het normale doorlichten, waarbij object en scherm vlak bij elkaar zijn opgesteld, kan men op twee manieren vergrooten: 1) men kan het object en de röntgenbuis laten staan en het scherm verder weg plaatsen (a constant, b en dus ook $a + b$ grooter); 2) men kan het scherm en het focus laten staan en het object dichter bij het focus brengen (a kleiner, b grooter, $a + b$ constant). De schermhelderheid is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand $(a + b)$ tusschen focus en scherm; bij de eerste methode krijgt

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

men dus bij het vergrooten een aanzienlijke daling in helderheid, terwijl bij de tweede methode de (primaire) helderheid constant blijft.

Om de boven geschetste nadeelige gevolgen van een helderheidsdaling te ontgaan, lijkt de tweede methode het meest gewenscht. Voor het materiaalonderzoek kan men haar echter niet altijd toepassen, met name niet in die gevallen, waar reeds bij het normale doorlichten, juist om een zo groot mogelijke schermhelderheid te verkrijgen, het object en het scherm zoo dicht bij de röntgenbuis worden geplaatst als de afmetingen van het object maar toelaten. Vergrooten kan men dus in zoo'n geval slechts door het scherm verder weg te zetten en men moet dan de helderheidsdaling, evenredig met $(a + b)^2$, of wegens verg. (2), met v^2, op de koop toe nemen.

In de medische diagnostiek daarentegen plaatst men bij het normale doorlichten den patient altijd op vrij groote afstand van het focus, teneinde een onvervormd overzichtsbeeld van het object in kwestie te verkrijgen [4]). Opvoeren van de schermhelderheid, door patient en scherm dichter bij het focus te plaatsen, zou hier geen zin hebben, daar men een grootere helderheid eveneens door verhoogen van de focusbelasting (stroom door de röntgenbuis) zou kunnen bewerkstelligen. Dat men dit niet doet en het focus dus lang niet tot de toelaatbare grens belast, vindt zijn oorzaak in de beperking van de röntgendosis die den patient bij een doorlichting mag worden toegediend. De stralingsintensiteit op den patient, waardoor bij benadering ook de schermhelderheid reeds is bepaald, wordt zoo laag gekozen, dat de arts een tijd van enkele minuten voor het bekijken en afzoeken van het doorlichtingsbeeld mag besteden en daarbij nog ruimschoots beneden de toegelaten dosis blijft. Wil men nu overgaan tot vergroot doorlichten, dan kan men in dit geval de tweede methode toepassen, dwz. den patient dichter bij het focus brengen, mits men met een overeenkomstig kortere waarnemingstijd volstaat teneinde de dosis op den patient ondanks de sterkere bestralingsintensiteit aan de veilige kant te houden. Daar de afstand tusschen focus en scherm hier onveranderd blijft, is de (primaire) schermhelderheid bij het vergroot doorlichten niet kleiner dan bij normaal doorlichten.

Schermhelderheid en focusbelasting

We hebben uiteengezet, dat voor het vergroot doorlichten een veel kleiner focus noodzakelijk is dan normaal wordt gebruikt. Wordt het focus normaal tot aan de grens belast van het vermogen, dat het per eenheid van oppervlak continu kan ontvangen zonder te heet te worden, dan beteekent verkleining van het focus noodzakelijk een reduceeren van de stroomsterkte in de röntgenbuis en daarmee weer een achteruitgang van de schermhelderheid. Bij het materiaalonderzoek, waar vermogens van 2 kW, bijv. 150k V_{max}, 20 mA, en nog meer continu worden gebruikt, komt men inderdaad al bij de normale groote foci in de buurt van de toelaatbare focustemperatuur. Toch behoeft het verkleinen van het focus de schermhelderheid niet in die mate te benadeelen als uit de verhouding der focusoppervlakken zou volgen. Een kleiner focus bezit nl. een belangrijk hoogere specifieke focusbelastbaarheid (bij dezelfde focustemperatuur). Dit is te danken aan het feit, dat de op het focus ontwikkelde warmte bij het kleine focus niet alleen naar binnen in de anode maar ook in merkbare mate door zijdelingsche afvoer wordt weggeleid (randeffect). Bovendien kan men de specifieke focusbelastbaarheid nog opvoeren door toepassing van een roteerende anode [5]).

In de medische diagnostiek komt men, tengevolge van de vermelde beperking van de dosis op den patient, bij het normale doorlichten lang niet aan de toelaatbare specifieke focusbelasting toe. Men werkt er bijv. met een buisspanning van 75 kV_{max} en een stroom van 3 mA, d.i. een continue belasting van ca 150 watt. Hierbij is het overbodig om de anode te laten roteeren. Verkleint men nu het focus, dan stijgt de focustemperatuur en bij de kleinste verwezenlijkte foci, van 0,3 mm, blijkt het noodzakelijk de anode te laten draaien teneinde de genoemde 150 watt te kunnen toepassen [6]).

Constructie der röntgenbuizen met zeer klein focus

Het verkrijgen van een klein focus vereischt een sterke concentratie van de electronenbundel die door de gloeidraad van de röntgenbuis wordt uitge-

[4]) Bevindt de patient zich dicht bij het focus, dan zijn de relatieve afstandsverschillen voor diverse in het lichaam gelegen details zoo groot, dat sommige aanzienlijk grooter worden afgebeeld dan andere.

[5]) Zie bijv. J. H. van der Tuuk, Röntgenbuizen met draaiende anode („Rotalix"-buizen), Philips techn. T. **8**, 33, 1946 (nr. 2); ook Philips techn. T. **3**, 296, 1938.

[6]) Er zij op gewezen, dat de vergrootingstechniek vooralsnog, althans wat betreft de scherpteverbetering, geen nut heeft voor het maken van röntgenfoto's. Weliswaar is hier ook een soort „schermonscherpte" aanwezig, nl. de korreloonscherpte der gebruikelijke versterkingsfolies. Doch bij vergroot fotografeeren zou bij bewegende objecten de bewegingsonscherpte sterk moeten toenemen, daar het kleine focus voor momentopnamen in elk geval minder hoog belastbaar is dan een groot focus en men alleen al om deze reden langer zou moeten belichten. Voor stilstaande objecten kan men zonder bezwaar langer belichten, maar juist daarom kan men hier, indien grootere scherpte gewenscht is, de versterkingsfolies achterwege laten, zoodat alleen de zeer geringe intrinsieke onscherpte van de röntgenfilm zelf overblijft.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zonden. In buizen voor materiaalonderzoek, waarbij het focus soms in allerlei holten moet worden gebracht, bevindt zich de anode met het focus veelal in een uitsteeksel van de buis, op eenige tientallen cm afstand van de gloeidraad. Voor de kleine alsook voor de normale groote foci is dan de vereischte concentratie alleen te bereiken door een focusseering met behulp van een of meer magneetspoelen. Deze methode geeft goede resultaten, maar is nogal omslachtig. De focusseering is nl. bij een gegeven magneetveld alleen goed voor een bepaalde electronensnelheid. Wil men de spanning op de röntgenbuis, naar gelang van het te doorlichten object, varieeren, dan moet telkens ook de bekrachtigingsstroom der magneetspoelen opnieuw nauwkeurig worden ingesteld. Wenscht men een uiterst klein focus, dan luistert niet alleen deze instelling zeer nauw, maar bovendien is voor het bedrijf van de buis een zorgvuldig afgevlakte en constant gehouden gelijkspanning noodig, daar anders de focusgrootte met de rimpel van de buisspanning merkbaar op en neer gaat!

Bij röntgenbuizen waarbij kathode en anode slechts op ca 1 cm onderlinge afstand worden geplaatst — in de medische diagnostiek maakt men uitsluitend van zulke buizen gebruik —, is het probleem veel bevredigender op te lossen door een electrostatische focusseering toe te passen. Dit komt er op neer, dat men door geschikte vormgeving van de kathode de potentiaal tusschen kathode en anode zoodanig laat verloopen dat er een sterke electrostatische „lens" wordt gevormd. Deze focusseering is onafhankelijk van de buisspanning. De potentiaal van elk punt in het afbuigende veld verandert immers evenredig met de buisspanning mee; daar de afbuigende werking op een electron evenredig is met deze potentiaal, en anderzijds omgekeerd evenredig met de, het electron versnellende, buisspanning, heffen de beide invloeden elkaar precies op.

De in de Philips laboratoria ontwikkelde buizen met zeer klein focus („fijnfocusbuizen") werken dan ook met electrostatische focusseering. In *fig.* 7 is de kathode van een dergelijke buis afgebeeld. Men ziet dat in twee gleuven van de kathode twee gloeispiraaltjes zijn gemonteerd, een groote en een heel kleine. Deze kunnen naar keuze ingeschakeld worden. De dunne spiraal levert het fijne focus van 0,3 mm breedte, de dikke levert een focus van 2 mm of, bij andere buizen, van 1,2 mm breedte, dat bebestemd is voor normaal doorlichten en voor het maken van foto's.

De grootte van het verkregen focus wordt op bekende wijze gecontroleerd door er een foto met een pinhole camera van te maken. De opening van deze camera, die normaal 0,2 mm wijd wordt gemaakt, moet in dit geval aanzienlijk kleiner zijn (ca 0,03 mm), teneinde het fijne focus voldoende scherp af te beelden.

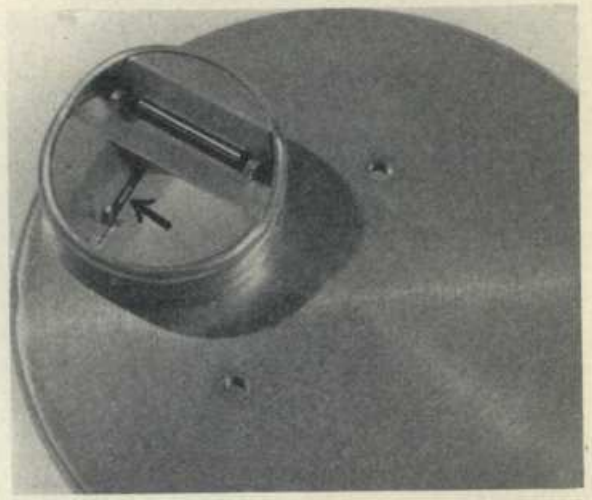


Fig. 7. Kathode van een dubbelfocus-röntgenbuis met roteerende anode, door Philips speciaal ontwikkeld met het oog op de vergrootingstechniek. De dikke gloeispiraal levert een focus van 2,0 mm breedte, waarmee opnamen worden gemaakt, de dunne spiraal (bij de pijl) levert een focus van slechts 0,3 mm breedte, dat voor het normaal en vergroot doorlichten is bestemd. Dank zij de speciale constructie van de kathodedop worden de uitgezonden electronen electrostatisch op de anode gefocusseerd.

Daar de buis tevens voor het maken van röntgenfoto's dient met gebruik van het grootere focus, is de anode roteerend gemaakt, wat trouwens volgens het bovenstaande ook gewenscht is om het kleine focus hoog te kunnen belasten. Bij de gebruikelijke constructies van de roteerende anode loopt de rotor in twee kogellagertjes. De leidringen hiervan hebben zoowel in de rotor als op de anodedrager eenige tiende mm axiale speling teneinde de verschillen in warmte-uitzetting van rotor en anodedrager te kunnen opvangen. Voor het werken met het kleine focus is echter de genoemde speling zeer ongewenscht. Immers, er kunnen hierdoor axiale trillingen van de anode optreden; aangezien het focus daarbij loodrecht op de richting van de nuttige röntgenstralenbundel verschuift, ontstaat een procentueel aanzienlijke vergrooting van de schijnbare focusbreedte. Om dit effect te vermijden is een bijzondere lagering aan de rotor aangebracht waardoor de axiale tolerantie tot enkele honderdste mm wordt beperkt.

Practische toepassing van het vergroot doorlichten

In het materiaalonderzoek

Het hierboven medegedeelde omtrent de beperking van de dosis in de medische diagnostiek zou de indruk kunnen wekken, dat de algemeene situatie

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

voor het normale doorlichten in het materiaalonderzoek veel gunstiger is. Men kan hier werken met zeer kleine afstand tusschen focus en object, met de maximale focusbelasting, met (afgezien van economische overwegingen) willekeurig lange waarnemingstijden. Deze voordeelen worden echter practisch gecompenseerd door het nadeel dat men in het materiaalonderzoek te maken heeft met veel sterker absorbeerende objecten. Een ijzeren plaat van 0,02 mm dikte of een aluminium plaat van 4,5 mm absorbeeren (bij eenzelfde buisspanning van 75 kV) evenveel als de borstkas van een patient. De schermhelderheid is bij het materiaalonderzoek daardoor geenszins zoo ruim voldoende, als men zou denken. Ook kan men zich in een werkplaats practisch niet met zulke lage schermhelderheden tevreden stellen als in de röntgenkamer van een medische inrichting. Het gevolg is dat de toepassing van het doorlichten in het materiaalonderzoek steeds beperkt is gebleven tot de, betrekkelijk weinig absorbeerende, lichte metalen als aluminium- en magnesium-legeeringen.

Het vergroot doorlichten roept, zooals hierboven werd uiteengezet, in het materiaalonderzoek in het algemeen een tegenstelling op tusschen scherpte en helderheid. Een dergelijk antagonisme bestaat echter ook reeds bij de normale doorlichtingstechniek. De vroeger opgegeven schermonscherpte van 1,0 mm geldt nl. alleen voor zeer gevoelige schermen, die een groote helderheid leveren. Zou men genoegen nemen met een minder gevoelig scherm, dat bijv. een half zoo groote helderheid geeft, dan krijgt men ongeveer een half zoo groote onscherpte. Het compromis, dat in het normale doorlichten tot de keuze van een bepaald scherm heeft geleid, wordt bij het vergroot doorlichten als het ware opnieuw aan de orde gesteld, en het is dus a priori nog een open vraag, of het vergrooten in het materiaalonderzoek inderdaad zin heeft. De practijk heeft een bevestigend antwoord op deze vraag gegeven en bij het doorlichten van lichte metalen wordt dan ook de vergrootingstechniek sinds een aantal jaren vaak toegepast. We zullen op de resultaten hiervan niet verder ingaan, maar volstaan met te verwijzen naar een publicatie hieromtrent [7]).

In de medische diagnostiek

We hebben gezien, dat in de medische diagnostiek het vergroot doorlichten niet behoeft te leiden tot een verlies in (primaire) schermhelderheid, maar slechts tot een beperking van de waarnemingstijd. De gunstige resultaten, die hier derhalve konden worden verwacht, gaven aanleiding om de mogelijkheid van het vergroot doorlichten in de Medische Afdeeling der Philipsfabrieken aan een systematisch onderzoek te onderwerpen.

Dit onderzoek, waarvan eenige voorloopige resultaten elders werden gepubliceerd [8]), werd hoofdzakelijk in twee richtingen uitgevoerd. Ten eerste werden waarnemingsproeven verricht met een fantoom van „Philite", dat wat de absorptie en verstrooiing van röntgenstralen betreft, ongeveer overeenkomt met de borstkas van een patient. In het fantoom waren een aantal gaatjes van verschillende diameter en diepte geboord. De grafische voorstelling in *fig. 8* geeft aan, hoe de zichtbaarheid

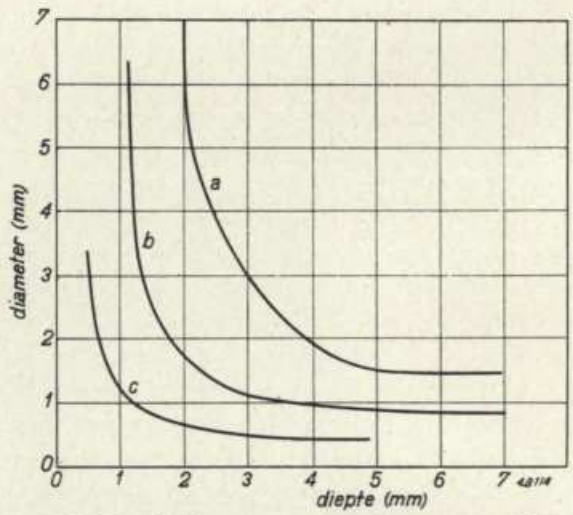


Fig. 8. Zichtbaarheidsproeven aan een fantoom van „Philite", dat voor de röntgendoorlichting ongeveer aequivalent is met de menschelijke long. In het fantoom waren gaatjes van verschillende diameter en diepte geboord. Uitgezet is voor elke diepte (in mm) de diameter van het kleinste waarneembare gaatje (eveneens in mm).
a) Bij doorlichting zonder vergrooten, focusbreedte 0,4 mm, buisspanning 70 kV_{max}, buisstroom 1,4 mA.
b) Bij doorlichting met 4 maal vergrooten; gegevens als in (*a*).
c) Op een röntgenfoto onder optimale condities.

van deze gaatjes was bij normaal doorlichten (*a*), bij doorlichten met 4 maal vergrooten (*b*) en op een goede röntgenfoto (*c*). Men ziet de belangrijke vooruitgang, verkregen bij de overgang van normaal naar vergroot doorlichten. Bovendien bleek reeds bij dit onderzoek, welke belangrijke rol het vermelde feit speelt, dat de apperceptie bij het groote beeld gemakkelijker en vlugger geschiedt dan bij een klein beeld. Hierdoor wordt de noodzakelijke verkorting van de waarnemingstijd van een patient (tot bijv. 10 à 20 seconden), die we boven hebben besproken, minder erg gevoeld.

Ten tweede werden groepen van longpatienten in het routineonderzoek van het consultatiebureau,

[7]) Zie R. Berthold, Atlas der zerstörungsfreien Prüfverfahren, T/Rö 10/7-10, J. A. Barth, Leipzig 1938.

[8]) G. C. E. Burger, Hand. 29. Ned. Nat. Gen. Congres, Amsterdam 1943, p. 47. Hieraan is ook de fig. 8 ontleend.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

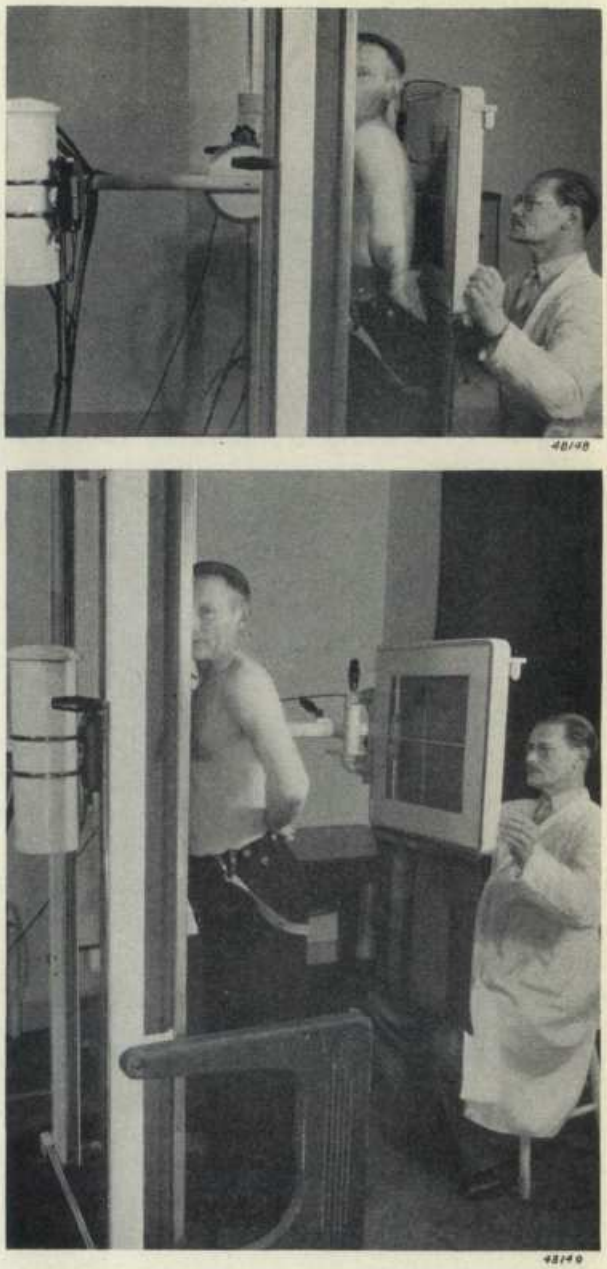
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

behalve met gewone, ook met vergroote doorlichting onderzocht. De geïmproviseerde opstelling waarmee deze proefnemingen werden verricht, is in *fig. 9* afgebeeld. Een op rollen geplaatst statief draagt de röntgenbuis en het doorlichtingsscherm. Het scherm ligt eerst vlak tegen den patient aan, zoodat een normaal overzichtsbeeld wordt verkregen. Na dit even bekeken te hebben en vastgesteld te hebben, op welk onderdeel van het beeld hij speciaal zijn aandacht moet richten, doet de waarnemer een of twee stappen achteruit en trekt het statief met scherm en buis met zich mee, terwijl de patient op zijn plaats blijft staan. Op het grooter wordende beeld kan de waarnemer nu het gefixeerde onderdeel nauwkeuriger zien.

Een gemis voor den arts is het, dat hij bij het vergrooten letterlijk het contact met den patient verliest. Bij het normaal doorlichten is het voor hem van zeer groot nut, dat hij den patient iets kan draaien en heen en weer bewegen om aldus, door mede-inschakeling van de tastzin, tot een „meerzintuigelijke" waarneming te komen. Bij het vergrooten moet de arts hiervan afzien, eenerzijds omdat de tijd te kort is, anderzijds omdat zijn armen niet lang genoeg zijn om van achter het ver verwijderde scherm den patient te kunnen grijpen.

Desondanks gaf het onderzoek bemoedigende resultaten. Uit een kleine statistiek van 51 onderzochte gevallen [9]) bleek, dat door het vergroot doorlichten bij 10 patienten een beter inzicht in de structuur van een longproces werd verkregen, 8 maal het al dan niet aanwezig zijn van een caverne met grooter zekerheid werd geconstateerd (de diagnose werd later met het nog betere fotografische beeld gecontroleerd), en algemeen in 35 gevallen een verbetering was te boeken, tegenover 16 gevallen waar vergroot doorlichten geen concreet voordeel opleverde.

Een der practische problemen, die nog zullen moeten worden opgelost alvorens het vergroot doorlichten zijn intrede in de dagelijksche practijk van den röntgenoloog kan doen, is de afdoende beveiliging van den patient tegen een te groote dosis röntgenstralen. Dit zal des te noodzakelijker zijn, aangezien juist de moeilijke of interessante gevallen, die het dankbaarste object voor de vergrootingstechniek vormen, ook bij het normale doorlichten meestal al langer worden bekeken dan gewoonlijk. En het geldt nog in sterkere mate voor de doorlichting van de buikorganen dan van de longen, aangezien men bij de eerstgenoemde wegens de sterkere absorptie met grootere bestralingsintensiteiten, en in sommige gevallen (maagonderzoek) ook met langere waarnemingstijden moet werken.



a

b

Fig. 9. Geïmproviseerde opstelling voor het vergroot doorlichten van longpatienten, in het consultatiebureau van de Medische Afdeeling der Philipsfabrieken. De patient is vast opgesteld, het doorlichtingsscherm en de röntgenbuis zijn star met elkaar verbonden en kunnen door den waarnemer verschoven worden. Daar de patient bij de, periodiek herhaalde, normale doorlichting steeds met de rugzijde naar de buis staat en het rugoppervlak daardoor telkens de grootste bestralingsintensiteit moet verduren (vier maal zooveel als een punt midden in de long), is de patient hier voor de grootere veiligheid met de borstzijde naar de buis geplaatst.
a) Situatie voor normaal doorlichten.
b) Situatie voor vergroot doorlichten.

[9]) G. C. E. Burger, nog niet gepubliceerd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE TECHNIEK VAN ONDERZOEKINGEN MET RADIOACTIEVE EN STABIELE ISOTOPEN

door A. H. W. ATEN Jr. en F. A. HEYN. 539.155.2:539.167.3:539.16.08

Bij het gebruik van indicatoren (gemerkte atomen) voor wetenschappelijk of technisch onderzoek heeft men te maken met radioactieve, in enkele gevallen ook met stabiele isotopen van bepaalde elementen. Voor zoover de keuze niet door het probleem zelf wordt voorgeschreven, is het vaak de halveeringstijd der radioactieve isotopen die haar bepaalt; de halveeringstijd mag niet te groot en niet te klein zijn. Op stabiele isotopen is men thans alleen nog in het geval van zuurstof en stikstof aangewezen, terwijl ook zware waterstof nog veel gebruikt wordt. De bereiding der radioactieve isotopen geschiedt door kernreacties, die bijv. met behulp van een cyclotron, een hoogspanningsinstallatie of in een uraniumzuil teweeg worden gebracht. Stabiele isotopen worden door afscheiding uit de in de natuur aanwezige isotopenmengsels gewonnen, bijv. door gefractionneerde electrolyse, destillatie of diffusie. De synthese van eventueel gewenschte verbindingen van gemerkte atomen is in de practijk nog een der moeilijkste problemen die zich bij de toepassing der methode kunnen voordoen. Soms wordt een elegante oplossing verkregen door synthese langs biologische weg, dwz. in micro-organismen of in het dierlijke lichaam. Het analyseeren der bij de toepassing van de methode verkregen isotopenmengsels geschiedt bij de radioactieve isotopen door radioactiviteitsmeting, bijv. met een electronenteller; allerlei bijzonderheden hiervan komen in dit artikel ter sprake. Voor nauwkeurige localisatie van de radioactieve isotopen zijn auto-radiogrammen zeer geschikt. Stabiele isotopenmengsels worden met de massaspectrograaf of, o.a. in het geval van zware waterstof, door dichtheidsmeting geanalyseerd.

Het beknopte overzicht, dat wij in het vooraf-gaande nummer van dit tijdschrift hebben gegeven van de methode der indicatoren of „gemerkte atomen" (tracers) en haar toepassingsmogelijkheden [1]), zal in dit artikel worden aangevuld met een bespreking van de wijze, waarop men deze methode ten uitvoer legt.

Wij resumeeren even de belangrijkste punten van het genoemde artikel.

Van elk chemisch element, behoorende op een bepaalde plaats in het periodieke systeem, bestaan verscheidene atoomsoorten, die in atoomgewicht verschillen. Deze onderling „isotope", chemisch niet onderscheidbare, atoomsoorten kunnen òf stabiel zijn òf radioactief. Nemen twee isotopen van een element aan een physisch of chemisch proces deel, dan gedragen zij zich op vrijwel dezelfde wijze. Toch is het eene isotoop, hetzij doordat het radioactief is, hetzij door zijn afwijkend atoomgewicht, in elk stadium van het proces in principe door den onderzoeker te herkennen, te localiseeren en kwantitatief te bepalen. De atomen hiervan zijn als het ware gemerkt, zij kunnen als „indicatoren" dienen.

Van dit feit wordt gebruik gemaakt voor het onderzoek van zeer veelsoortige processen, ten eerste vanwege het groote gemak, waarmee men verblijf, hoeveelheid en verdeeling van een radioactieve stof bepaalt, en vanwege de uiterst groote gevoeligheid, die men hierbij zonder moeite kan bereiken; ten tweede omdat een bepaald soort processen uitsluitend door de indicatorenmethode voor onderzoek toegankelijk geworden is, nl. die processen waarbij een uitwisseling van chemisch identieke deeltjes te pas komt. Technische voorbeelden hiervan zijn de diffusie van een stof in een identieke omgeving en de materiaaloverdracht bij de wrijving tusschen twee identieke oppervlakken. Vooral op het gebied der chemie en in de physiologie van plant en dier spelen dergelijke processen een belangrijke rol.

Als men een onderzoek met behulp van gemerkte atomen wil uitvoeren, komt men in hoofdzaak voor de volgende practische vragen te staan:

1) Welke atoomsoort moet men kiezen?
2) Hoe verkrijgt men die atoomsoort?
3) In welke vorm (chemische verbinding) zal men de atomen gebruiken en hoe brengt men ze in die vorm?
4) Hoe analyseert men de isotopenmengsels, die bij de proeven optreden?

Het antwoord op de vragen 2, 3 en 4 zal veelal eenvoudig kunnen luiden: men bestelt de gemerkte atomen of eventueel de gewenschte verbinding daarvan bij het dichtstbij gelegen, hiervoor geoutilleerde laboratorium, en men stuurt de te analyseeren mengsels naar ditzelfde adres ter analyse. Het feit, dat verschillende laboratoria, die over de noodige installaties beschikken — in Europa o.a. het Philips Laboratorium te Eindhoven —, de gelegenheid tot deze werkwijze hebben opengesteld, heeft de snelle verbreiding van de indicatorenmethode ten zeerste bevorderd. Toch zal het ook voor dengene, die zich aldus van de zorg omtrent de vragen 2, 3 en 4 ontheven ziet, van belang zijn om georienteerd te zijn omtrent de techniek waarmee men deze vragen oplost.

Keuze der atoomsoort

Bij de eerste proeven met indicatoren, die door Hevesy en anderen werden gedaan, werd meestal gebruik gemaakt van een radioactief isotoop van lood, soms ook van thallium of bismuth. Men onderzocht bijv. het opnemen van lood-ionen door planten, of de verdeeling van toegediend lood tusschen een gezwel en het normale weefsel in het dierlijk lichaam. Daar de plant en het dierlijk lichaam normaal geen lood bevatten, had men in principe deze proeven ook wel met behulp van een che-

[1]) Philips techn. T. 8, 296, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

mische analyse kunnen uitvoeren, hetgeen alleen afstuitte op de practische moeilijkheid om de uiterst kleine in het spel zijnde hoeveelheden lood te bepalen, waarvoor de radioactiviteitsmeting juist bijzonder geschikt is.

Het lag voor de hand, dat dergelijke proeven, uitgevoerd met stoffen die wèl in de plant of het dier voorkomen en bij de natuurlijke functies daarvan betrokken zijn, veel belangrijker resultaten konden opleveren. Bovendien waren zulke proeven ook uit een oogpunt van methodiek interessanter, daar chemische analyses hier principieel moesten falen, en slechts de gemerkte atomen, die ook in een chemisch identiek milieu te herkennen zijn, de mogelijkheid tot deze proeven konden scheppen.

De reden, waarom de pioniers der methode juist lood, thallium of bismuth kozen, was dan ook eenvoudig, dat men toen geen andere gemerkte atomen bezat. De genoemde drie zijn nl. de eenige niet-radioactieve elementen, waarvan men in de natuur radioactieve isotopen met voldoend sterke radioactiviteit aantreft.

Thans is de situatie echter geheel anders. Sinds de ontdekking der kunstmatige radioactiviteit in 1934 heeft men geleerd, om van elk element één of zelfs verschillende radioactieve isotopen te maken. Door de uitwerking van methoden voor de scheiding van isotopen kan men ook van een reeks elementen stabiele isotopen in voldoende hoeveelheden bereiden om er practisch mee te kunnen werken. Men heeft dus een zoo ruime keuze van gemerkte atomen, dat men haast van embarras de choix zou moeten spreken, wanneer er niet weer een aantal factoren waren, die de keuze beperken.

Om te beginnen wordt de keuze vaak door het probleem zelf voorgeschreven. Betreft het bijv. de diffusie van bepaalde legeeringsbestanddeelen in staal, en de invloed daarvan op de eigenschappen van de legeering, dan zal men wegens de meestal zeer specifieke invloed van een legeeringselement, gemerkte atomen van ditzelfde element moeten nemen. Evenzoo bij specifieke biologische effecten van sommige elementen, zooals bijv. de opneming van ijzer bij bloedarmoede.

Een voorbeeld van een probleem dat nog eenige vrijheid in de keuze laat, is het eerder beschreven onderzoek van de wrijving tusschen metaaloppervlakken[1]), althans zoolang men zich alleen voor het mechanisme van de wrijving interesseert en niet voor eventueele specifieke verschijnselen bij bepaalde metalen.

In vele gevallen wordt een beperking in de keuze opgelegd door de halveeringstijd van de in aanmerking komende radioactieve isotopen (d.i. de tijd waarin de radioactiviteit tot op de helft van de beginwaarde daalt). Een lijst van de halveeringstijden van een reeks veel gebruikte isotopen is in de *tabel* gegeven. De halveeringstijd moet liefst niet zeer klein, maar ook niet zeer groot zijn. Is hij zeer klein, dan beteekent dit, dat de radioactiviteit van een preparaat zeer snel daalt en, ondanks de groote gevoeligheid der meetinstrumenten, zoo spoedig beneden de aantoonbare grens komt, dat men niet voldoende tijd heeft om zijn proeven behoorlijk uit te voeren. Vooral geldt dit voor biologische problemen, waarbij men, in tegenstelling tot de scheikundige, de te onderzoeken processen ook niet door temperatuurverhooging of anderszins kan versnellen. Is de halveeringstijd zeer groot, dan beteekent dit, dat er per tijdseenheid slechts weinig atomen ontleden, de radioactiviteit is dan van meet af aan zoo gering, dat zij eventueel niet gemeten kan worden.

Een en ander wordt toegelicht door de krommen in *fig. 1a* en *b*. Men ziet hieruit tevens, dat zoowel bij te kleine als bij te groote halveeringstijd een verbetering voor de metingen wordt verkregen, wanneer men de concentratie van het radio-

Tabel I. Halveeringstijden van eenige radioactieve isotopen *).

Het symbool van elk chemisch element is rechts boven voorzien van zijn zg. massagetal (afgerond atoomgewicht) en links onder van zijn rangnummer in het periodiek systeem (kernlading).

Element	Atoomgewicht van het in de natuur voorkomende isotopenmengsel	Symbool van radioactief isotoop	Halveeringstijd
Waterstof	1,0081	$_1H^3$	31 jaren
Koolstof	12,010	$_6C^{11}$	20,5 minuten
		$_6C^{14}$	>1000 jaren
Stikstof	14,008	$_7N^{13}$	9,93 minuten
Zuurstof	16,000	$_8O^{15}$	2,1 minuten
Natrium	22,997	$_{11}Na^{22}$	3,0 jaren
		$_{11}Na^{24}$	14,8 uren
Magnesium	24,32	$_{12}Mg^{27}$	10,2 minuten
Fosfor	30,98	$_{15}P^{32}$	14,3 dagen
Zwavel	32,06	$_{16}S^{35}$	87,1 dagen
Chloor	35,457	$_{17}Cl^{38}$	37 minuten
Kalium	39,096	$_{19}K^{42}$	12,4 uren
Calcium	40,08	$_{20}Ca^{45}$	180 dagen
Mangaan	54,93	$_{25}Mn^{52}$	6,5 dagen
IJzer	55,84	$_{26}Fe^{59}$	47 dagen
Koper	63,57	$_{29}Cu^{64}$	12,8 uren
Broom	79,916	$_{35}Br^{82}$	34 uren
Strontium	87,63	$_{38}Sr^{89}$	55 dagen
Jodium	126,92	$_{53}J^{126}$	13 dagen
		$_{53}J^{128}$	25 minuten

*) Van de meeste hier genoemde elementen bestaan nog verscheidene andere, niet in de lijst opgenomen isotopen. De gegevens zijn ontleend aan G. Seaborg, Rev. mod. Phys. **16**, 1, 1944.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

actieve isotoop in het preparaat voldoende hoog opvoert. Zoo was het oorspronkelijk zeer lastig om proeven te doen met radioactieve koolstof, terwijl het in verband met de centrale rol van de koolstof in alle organisch-chemische verbindingen juist zeer gewenscht was zulke proeven te kunnen verrichten. Het isotoop C^{14} met een halveeringstijd van ca 10 000 jaren was te weinig actief, en bij C^{11} met een halveeringstijd van slechts 21 minuten moesten de proeven vaak voortijdig worden afgebroken. In latere jaren gelukte het echter om C^{11} in dusdanig groote concentraties te bereiden, dat men proeven hiermee, die gingen over de fotosynthese der koolhydraten in planten, gedurende meer dan 5 uren kon

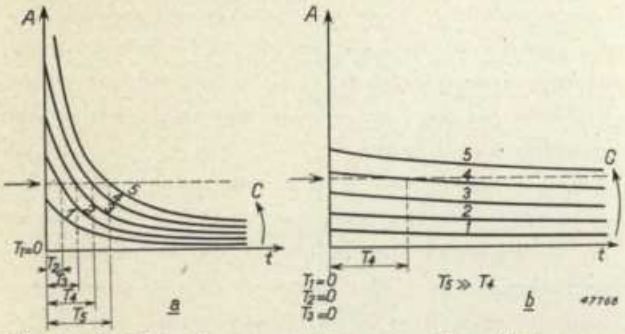


Fig. 1. Ontledingskrommen van een radioactief isotopenmengsel *a*) met een korte halveeringstijd, *b*) met een lange halveeringstijd. Elke kromme geldt voor een bepaalde beginconcentratie van het radioactieve isotoop in het mengsel; de concentratie *c* neemt in de pijlrichting toe. De gestippelde lijn geeft de minimale activiteit aan die met de meetinstrumenten practisch nog kan worden aangetoond. T_1-T_5 zijn de resp. tijden gedurende welke bij de vijf preparaten nog een meting van de activiteit mogelijk is. — De gestippeld aangegeven meetgrens zal voor preparaten met lange halveeringstijd in het algemeen lager liggen dan bij korte halveeringstijd. In het eerste geval kan men nl. de activiteitsmeting door een langduriger telling van stroomstooten bewerkstelligen, zoodat men reeds bij minder stooten per tijdseenheid voldoende ver uitkomt boven de statistische fluctuaties van activiteit en nuleffect (zie bij fig. 2 en aan het slot van het artikel).

voortzetten. Dit komt overeen met een daling van de activiteit tot op ca 1/30 000 van de beginwaarde; in werkelijkheid zal het activiteitsverschil tusschen begin- en eindpreparaat eventueel nog veel grooter zijn, daar immers de aard van de proef kan meebrengen, dat in het eindpreparaat slechts een fractie van de oorspronkelijke hoeveelheid koolstof zit.

Kan men de vereischte beginconcentratie van een isotoop met ongunstige halveeringstijd in de practijk niet verwezenlijken, dan bestaat nog de mogelijkheid om zijn toevlucht te nemen tot een stabiel isotoop van het desbetreffende element, al is het werken hiermee in het algemeen veel minder gemakkelijk dan met radioactieve isotopen. Het toeval wil, dat juist van de belangrijkste elementen der organische scheikunde: koolstof, waterstof, zuurstof en stikstof, de beschikbare radioactieve isotopen nogal ongunstige halveeringstijden hebben. Bij stikstof en zuurstof is men ook nu nog voor de meeste proeven aangewezen op de stabiele isotopen N^{15} en O^{18}. Voor proeven met gemerkte waterstof is vroeger op zeer groote schaal, en wordt ook thans nog, het „zware" waterstofisotoop met atoomgewicht 2, deuterium (H^2 of D), gebruikt.

Bij groote beginactiviteit, die men blijkens fig. 1*a* noodig heeft in geval van isotopen met korte halveeringstijd, kan zich een complicatie voordoen. Neemt men stofwisselingsproeven bij dieren, dan moet men er rekening mee houden, dat de radioactieve straling niet alleen als verklikker werkt, maar ook een destructieve werking op weefsels van het proefdier kan uitoefenen. Er bestaat gelukkig een tolerantiedosis, welke overschreden moet worden, eerdat een schadelijke invloed van de straling zich manifesteert. Zou de beginactiviteit zoo groot zijn, dat deze dosis overschreden wordt, dan moet men er op letten, of het verloop van de proeven niet door de gevolgen van de bestraling wordt gewijzigd.

In dit verband is het gewenscht er op te wijzen, dat het juist een der groote voordeelen van de indicatorenmethode is, dat men in principe de stofwisseling, zonder verstoring van de processen, bij normale levende dieren kan onderzoeken.

Terloops zij hier nog gewezen op het merkwaardige feit, dat niet alleen radioactieve, maar ook stabiele isotopen in te groote concentratie aan de levensfuncties van een proefdier schade kunnen toebrengen. Dit heeft men geconstateerd bij proeven omtrent de opneming en uitscheiding van water in proefdieren. Men laat de dieren daartoe water drinken, waarvan de moleculen voor een bekend percentage met zware in plaats van normale waterstof zijn samengesteld, en gaat later de dichtheid van het water in bloed, weefselvocht, urine enz. na. Bij de mensch, die voor 80% gewicht uit water bestaat, bleek in 13 dagen de helft van al het water in het lichaam te worden verversch. Bij goudvisschen, die men eenvoudig in „zwaar water" liet zwemmen, bleek dat de watermoleculen in een visch reeds in de loop van enkele uren practisch geheel verversch worden. Was echter de concentratie van D_2O in het water zeer groot, zoodat veel H_2O-moleculen in de visch door D_2O werden vervangen, dan had dit de dood van het proefdier tengevolge.

Het bereiden van gemerkte atomen

De niet in de natuur voorkomende radioactieve isotopen kunnen worden gevormd door bepaalde transmutaties van atoomkernen (kernreacties). Voorbeelden van zulke transmutaties zijn:

$$_{16}S^{32} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{15}P^{32} + {}_{1}H^{1},$$
$$_{15}P^{31} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{15}P^{32} + {}_{1}H^{1}.$$

In het eerste geval ontstaat het instabiele fosforisotoop P^{32} uit een zwavelatoom en een neutron, in het tweede geval uit gewone fosfor en deuterium. Deze kernreacties vinden niet, zooals chemische reacties, plaats, zoodra de electronenwolken der atomen in elkaars nabijheid komen, waarvoor slechts weinig energie noodig is, maar vereischen een directe beïnvloeding van de kernen der atomen door bepaalde deeltjes (bijv. protonen of neutronen), hetgeen moet worden bewerkstelligd door deze met zeer groote energie op elkaar te laten botsen. In ons eerste voorbeeld verkrijgt men de noodige neutronen door deuteriumionen op een lithium-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

preparaat te schieten; de neutronen die hierbij vrijkomen, laat men in een vat met zwavelkoolstof treden, waarin volgens de vergelijking zwavelkernen in $_{15}P^{32}$ worden omgezet. Deze fosfor kan, nadat men een zekere hoeveelheid gewone fosfor heeft toegevoegd om tot practisch hanteerbare hoeveelheden te komen, tezamen met deze langs chemische weg worden afgescheiden.

Is het eindproduct van een kernreactie een isotoop van het oorspronkelijke atoom, zooals in ons tweede voorbeeld, dan lijkt een chemische afscheiding op het eerste gezicht niet mogelijk. Gaat men echter uit van een verbinding van het te transmuteeren element, dan zal elk atoom, dat getransmuteerd wordt, door de schok uit het molecuul worden geworpen, zoodat het reactieproduct ontstaat in de vorm van vrije atomen of ionen, die men dan uit de verbinding kan isoleeren.

De voor kernreacties vereischte groote energieën kunnen aan de atomen worden gegeven in een cyclotron, waarin de (geïoniseerde) atomen langs een spiraalvormige baan tot enorme snelheden, overeenkomende met spanningen van eenige millioenen of zelfs tientallen millioenen volt, worden versneld; of in een hoogspanningsinstallatie, die met een spanning van eenige honderdduizenden of millioenen volt werkt [2]). Het rendement der kernreacties is echter in het algemeen zeer klein, zoodat men zeer intensieve bundels van bombardeerende deeltjes noodig heeft om de gewenschte concentraties van gemerkte atomen te verkrijgen. De apparatuur voor het bereiden der gemerkte atomen wordt derhalve zoo omvangrijk en kostbaar, dat zij slechts in enkele laboratoria kan worden opgesteld. Zooals reeds vermeld, stellen echter verschillende van dergelijke instituten de vervaardigde preparaten van gemerkte atomen voor iederen onderzoeker verkrijgbaar. Er zij nog op gewezen, dat een nieuwe mogelijkheid voor het verkrijgen van radioactieve elementen geopend is door de constructie van de uranium-zuilen („piles"), die bij de ontwikkeling der atoombom zulk een voorname rol hebben gespeeld; hiermee kan men talrijke radioactieve stoffen bereiden.

Het afscheiden van de door een kernreactie ontstane radioactieve stof is niet in alle gevallen noodzakelijk. De reeds vermelde proeven over de wrijving tusschen metaaloppervlakken bijv. werden gedaan met metaalplaatjes, die in een cyclotron werden bestraald, waardoor een klein gedeelte der atomen in het oppervlak ter plaatse werden getransmuteerd. De plaatjes konden zonder verdere bewerking worden gebruikt.

Een soortgelijk geval doet zich voor bij een bepaalde methode van chemische analyse. Indien in een mengsel van verschillende elementen er één voorkomt, waarin men door bestraling radioactiviteit kan opwekken, zonder dat in een der andere elementen een radioactiviteit met een vergelijkbare halveeringstijd ontstaat, kan men uit de sterkte van die straling concludeeren, of, en in welke concentratie, dit bepaalde element aanwezig is. Zoo heeft men het voorkomen van spoortjes zwavel in papier, dat met de methoden der analytische scheikunde onmogelijk kan worden aangetoond, eenvoudig kunnen demonstreeren door het papier aan de sterke neutronenstraling van een cyclotron bloot te stellen, waarna een radioactief transmutatieproduct van zwavel kon worden aangetoond. De indicatorenmethode treedt hier in een rudimentaire vorm op: met het bereiden en aantoonen der gemerkte atomen is hun rol al uitgespeeld, zij behoeven niet meer aan een of ander proces deel te nemen.

Over de bereiding van stabiele isotopen als indicatoren zullen we kort zijn. Van de in de natuur voorkomende elementen bestaan vele uit verschillende stabiele isotopen, die in bepaalde verhoudingen zijn gemengd. Stikstof bijv. bestaat voor 99,6% uit $_7N^{14}$ en voor 0,4% uit $_7N^{15}$. Men kan deze bestanddeelen scheiden door gebruik te maken van de verschillen in diffusiesnelheid of reactiesnelheid, welke verschillen berusten op het verschil in atoomgewicht. Weliswaar zal, wanneer men het mengsel bijv. aan een diffusieproces onderwerpt, de verhouding der isotopen aan het einde slechts enkele % verschillen van die aan het begin [3]). Laat men echter het verkregen mengsel opnieuw hetzelfde proces doorloopen en herhaalt dit nog vele malen, dan kunnen tenslotte zeer groote afwijkingen van de oorspronkelijke isotopenverhouding het resultaat zijn. Dit zal des te sneller gebeuren, hoe grooter het relatieve massaverschil, dus hoe lichter het element is. Zwaar water, dat men bij de electrolyse van water kan concentreeren, daar de normale waterstof aan de kathode vlugger uit het water verdwijnt dan de (oorspronkelijk in een verhouding van 1:5000 tot de normale

[2]) Zie bijv. F. A. Heyn en A. Bouwers, Een apparaat voor het transmuteeren van atoomkernen, Philips techn. T. **6**, 46, 1941. Over het cyclotron zie bijv.: W. B. Mann, The cyclotron, Methuen's Monographs, Londen 1940.

[3]) Het bij benadering constant blijven dezer isotopenverhouding is in vele gevallen juist een essentieele voorwaarde voor de bruikbaarheid der indicatorenmethode; immers, alle kwantitatieve onderzoekingen volgens deze methode zijn er in feite op gebaseerd, dat de aan het einde van een proces geconstateerde ruimtelijke verdeeling van het ééne isotoop een getrouw beeld is van de verdeeling van het geheele preparaat, resp. de geheele hoeveelheid van de stof, die men aan het proces heeft laten deelnemen. We komen hier straks nog even op terug.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

waterstof aanwezige) zware, wordt reeds in enkele stappen met een zuiverheid van 96% of nog meer verkregen.

De stabiele isotopen ${}_8O^{18}$, ${}_7N^{15}$, en zwaar water, zijn tegenwoordig in de handel verkrijgbaar. Zwaar water was vroeger zeer kostbaar: een preparaat met 96% D_2O kostte eenige malen zooveel als zijn eigen gewicht aan goud. Dit is veel beter geworden, doordat D_2O thans o.a. in Noorwegen op groote schaal gewonnen kan worden als bijproduct bij de bereiding van de voor ammoniaksynthese benoodigde waterstof. Deze bereiding wordt nl. in dat land, waar de electrische energie zeer goedkoop is, langs electrolytische weg uitgevoerd. Het zuurstofisotoop ${}_8O^{18}$ bereidt men door gefractionneerde destillatie van water, gebruik makende van het feit, dat H_2O^{18} minder vluchtig is dan H_2O^{16}. Het stikstofisotoop ${}_7N^{15}$ wordt door een veelvuldig herhaald chemisch proces gewonnen.

De synthese van gemerkte verbindingen

In vele gevallen werkt men rechtstreeks met gemerkte elementen. Zeer vaak echter is er sprake van proeven met verbindingen dezer elementen, dwz. dat men feitelijk „gemerkte moleculen" noodig heeft. Hoe komt men nu aan deze verbindingen?

Meestal betreft het verbindingen, die de onderzoeker in ongemerkte vorm eenvoudig van de chemische industrie zou kunnen betrekken. Is dit niet het geval, dan zou hij tenminste als uitgangspunt voor de synthese in de handel verkrijgbare verbindingen kunnen kiezen, die zoo dicht mogelijk bij het gewenschte product staan en door eenvoudige operaties hierin zijn over te voeren. De gemerkte verbindingen echter zal de onderzoeker veelal zèlf moeten opbouwen, en dit zal soms nog worden bemoeilijkt door het feit, dat hij niet kan uitgaan van een nauw verwante verbinding, maar gedwongen is om uit te gaan van het gemerkte element als zoodanig, of eventueel van de verbinding, waarin het isotoop bij de vervaardiging is verkregen. Bij sommige radioactieve isotopen, zooals C^{11}, komt daar nog de moeilijkheid bij van de beperkte levensduur, die het noodzakelijk maakt de synthese zeer snel uit te voeren.

Komt de onderzoeker tengevolge van dergelijke moeilijkheden met de normale synthesemethoden niet of te moeizaam klaar, dan kan eventueel uitkomst worden gebracht door de elegante methode der synthese langs biologische weg. De min of meer gecompliceerde organische stoffen, die men voor vele physiologische onderzoekingen noodig heeft, treden veelal op als stofwisselingsproducten van dieren of van bepaalde micro-organismen. Stelt men bijv. aan een cultuur van B.pentosaceum (een bacteriesoort) glycerine ter beschikking tezamen met koolzuur met radioactieve koolstof, dan verkrijgt men in 30 minuten reeds 80% van deze koolstof in de vorm van propionzuur en barnsteenzuur. Met andere micro-organismen kan men weer andere verbindingen maken.

Een in vele gevallen bruikbare methode is het ook om dieren een tijdlang „zwaar water" te laten drinken, of planten met zwaar water te gieten. Na verloop van tijd, kan men uit de weefsels tal van verbindingen isoleeren waarin een deel van de normaal er in voorkomende waterstof door zware waterstof is vervangen.

Een soortgelijk geval van biologische synthese zien wij bij de winning van lecithine (een groep van fosforhoudende vetten), gemerkt door radioactieve fosfor. Met deze, in de laatste tijd veelal als „zenuwvoedsel" geadverteerde stof heeft men interessante proeven verricht. Voerde men radioactieve lecithine aan een rat, dan bleek na eenige tijd het bloed van de rat radioactief te zijn geworden; maar de radioactiviteit was niet te vinden in de, in het bloedplasma steeds aanwezige, lecithine, doch in het eveneens hierin aanwezige anorganische fosfaat. Dit beteekent, dat de lecithine niet als zoodanig door de darmwand wordt opgenomen om aldus in het bloed en in de organen te komen, maar dat de lecithine in de darm wordt gesplitst in zijn bestanddeelen. Men kan dus, in plaats van lecithine in te nemen, met hetzelfde resultaat een mengsel van vetten en anorganische fosfaten in de juiste verhouding consumeeren. Het lichaam bouwt dan zelf wel de lecithine op. Hiervan heeft men juist gebruik gemaakt om de voor deze proeven vereischte radioactieve lecithine te verkrijgen: men spuit bij een kip radioactief fosfaat in, en eenige dagen later kan men uit de dooiers der gelegde eieren radioactief lecithine isoleeren.

De analyse der isotopenmengsels

Bij de radioactieve isotopen geschiedt de analyse door meting van de radioactiviteit. Daar practisch alle in aanmerking komende radioactieve isotopen negatieve of positieve electronen uitzenden, kan de meting met een zg. electronenteller worden uitgevoerd [4]). Dit toestel bevat een gasontladingsbuisje, dat door een binnentredend electron voor

[4]) Zie bijv. A. Bouwers en F. A. Heyn, Een eenvoudig toestel voor het tellen van electronen, Philips techn. T. **6**, 74, 1941. Behalve electronentellers worden veelal ook ionisatievaten met electroscopen voor het meten van de radioactiviteit gebruikt. Deze apparaten zijn eenvoudiger, maar minder gevoelig. De navolgende beschouwingen gelden gelijkelijk voor alle meetinrichtingen, zoodat wij alleen over de teller behoeven te spreken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info · 11/14/2023

zeer korte tijd geleidend wordt gemaakt. In de stroomkring waarin het buisje is opgenomen, ontstaat daardoor een stroomstoot. Deze stooten worden versterkt en in een telapparaat geteld. Het aantal stooten per seconde levert een rechtstreeksche maat voor de radioactiviteit van het preparaat dat men in de nabijheid van het telbuisje heeft opgesteld.

Het is duidelijk, dat de aldus gemeten waarde voor de activiteit nog zeer sterk zal afhangen van de meetkundige configuratie, dwz. van de vorm en grootte van het preparaat en van de onderlinge afstand en plaatsing van preparaat en telbuis. Nu is het echter altijd voldoende om relatieve metingen te verrichten: men wil de radioactiviteit van twee preparaten, ofwel van één preparaat op verschillende tijdstippen, onderling vergelijken en hiervoor is het slechts noodig te zorgen voor een goede reproduceerbaarheid. In het meest voorkomende geval, dat men met poedervormige preparaten heeft te maken, pleegt men de poeders met een bepaalde laagdikte in een schaaltje van bepaalde afmetingen uit te spreiden, welk schaaltje dan in een goed gedefinieerde stand ten opzichte van de telbuis wordt gebracht (*fig. 2*).

Is het bij een proef slechts begonnen om het localiseeren van de radioactieve stof, zooals bij de vastgeloopen schraper in een oliepijpleiding die in het vorige artikel [1]) als voorbeeld werd genoemd, of zooals bij proeven omtrent de opneming van fosfor of kalium uit de bodem in verschillende deelen van een plant, dan kan men de leiding resp. de plant eenvoudig met het telbuisje aftasten. Nauwkeuriger localisatie is mogelijk met de eveneens reeds vermelde methode [1]) van het auto-radiogram. De opneming van zink in de vruchten van een tomatenplant heeft men bijv. nagegaan door een vrucht door te snijden en met het snijvlak op een fotografische plaat te leggen. Waar radioactief zink terechtgekomen is, vertoont de plaat na ontwikkeling een zwarting. De tomaat bleek het zink hoofdzakelijk in de pitjes op te slaan (*fig. 3*).

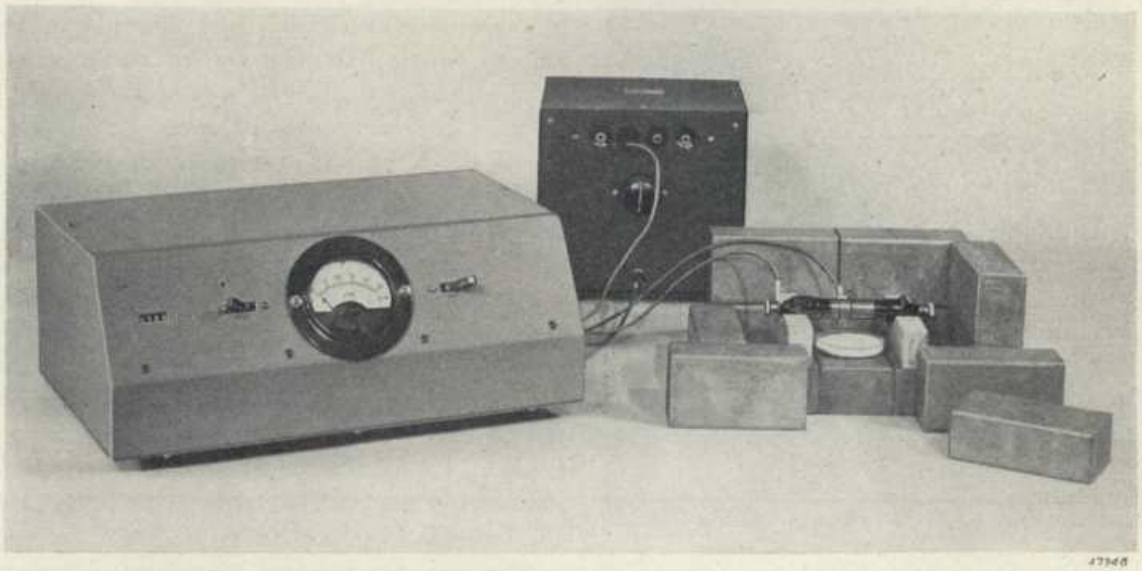


Fig. 2. Opstelling voor de radioactiviteitsmeting met een electronenteller. Onder het telbuisje bevindt zich een schaaltje, waarin het te onderzoeken poedervormige preparaat is uitgespreid (rechts). De beide polen van de telbuis zijn verbonden met het telapparaat, dat men links op de foto ziet staan. Achter in het midden ziet men het voedingsapparaat. Ook zonder aanwezigheid van een radioactief preparaat registreert de teller een zeker aantal stooten per minuut, veroorzaakt door de kosmische straling en door de natuurlijke radioactiviteit van de omgeving. Ter vermindering van dit zg. nuleffect wordt de telbuis met het preparaat alzijdig door looden blokken omgeven, hetgeen op de foto gedeeltelijk is te zien.

Voor meer kwantitatief onderzoek verascht men in proeven als boven genoemd de verschillende plantendeelen, zoodat de activiteit van elk deel in een zeer klein volume geconcentreerd wordt. De activiteit van deze verschillende preparaten kan worden vergeleken door telkens eenzelfde hoeveelheid onder de teller te brengen. Voor de vergelijking met het oorspronkelijke (zeer geconcentreerde) preparaat van de voedingsstof vult men dit zoonoodig door bijvoeging van inactieve asch tot de desbetreffende hoeveelheid aan, om dezelfde configuratie bij de meting te verkrijgen.

Een complicatie die in het algemeen bij de analyse van radioactieve preparaten optreedt, is de natuurlijke daling van de activiteit van een stof met de tijd. Men zou, wanneer men uit de activiteits-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

meting de fractie wil berekenen, die van de totale hoeveelheid radioactieve stof in het te analyseeren preparaat terecht is gekomen, telkens een van de tijd afhangende factor in rekening moeten brengen. Dit wordt echter op eenvoudige wijze vermeden,

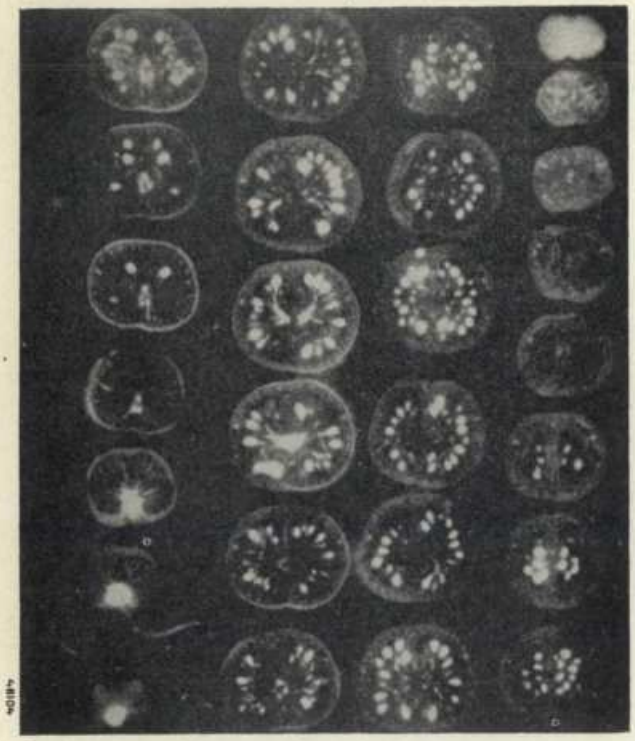


Fig. 3. Auto-radiogram van een doorgesneden tomaat. De plant was een tijdlang met radioactief zink gevoed. Dit heeft zich voor een groot deel in de vruchten, blijkens het radiogram hoofdzakelijk in de pitjes, opgehoopt.

indien men de gemeten activiteiten steeds uitdrukt in procenten van de activiteit van een deel van het oorspronkelijke preparaat, dat men niet aan de proeven heeft laten deelnemen. Daar de activiteit hiervan met dezelfde snelheid daalt, is de tijdfactor dan automatisch geëlimineerd.

De gevoeligheid, die met de electronenteller kan worden verkregen, is buitengewoon groot. Men kan met normale tellers een hoeveelheid van 10^5 radioactieve atomen aantoonen, d.i. 10^{-18} à 10^{-19} grammolecuul. De grens wordt gesteld door de statistische fluctuaties van het aantal per tijdseenheid zich ontledende atomen en de fluctuaties van het nuleffect (zie het bijschrift van fig. 2). In de preparaten waarmee men bij de indicatorenmethode werkt, is de concentratie van het radioactieve isotoop gewoonlijk hoogstens $1:10^{10}$ (zie het aangehaalde artikel[1])); men kan dan dus 10^{-9} grammolecuul van het preparaat aantoonen. Met speciale gevoelige tellers en met nog meer geconcentreerde preparaten is het zelfs gelukt om bijv. $2 \cdot 10^{-12}$ grammolecuul koper aan te toonen, d.i. een hoeveelheid van 10^{-10} gram.

Naar gelang van de reproduceerbaarheid van de meetconfiguratie die men kan bereiken, varieert de nauwkeurigheid van de radioactiviteitsmetingen met de teller tusschen ongeveer 0,1% en 5%. Komt men in de buurt van de gevoeligheidsgrens, dan wordt de nauwkeurigheid natuurlijk kleiner. Heeft men een nauwkeurigheid van 10%, dan wil dit zeggen, dat men bijv. de uitgewisselde hoeveelheden van de isotopen in uitwisselingsproeven slechts met een mogelijke fout van 10% kan bepalen. Soms is het echter zoo, dat een veel grootere nauwkeurigheid van de analyse weinig zin zou hebben. Het verschil in massa van twee isotopen brengt nl. ook een gering verschil in diffusie- en reactiesnelheid mede (zie hierboven, bij de bereiding van stabiele isotopen), zoodat de isotopenverhouding bij een physisch of chemisch uitwisselingsproces toch niet geheel en al constant blijft, maar een weinig, soms zelfs enkele procenten, kan veranderen.

De analyse van mengsels van stabiele isotopen is een probleem op zichzelf, dat we hier maar even willen aanstippen, gezien het kleinere belang dat deze isotopen voor de practische toepassing hebben. De oudste en in gemoderniseerde vorm nog veel gebruikte analysemethode is de „massaspectrografie" van Aston. In een gasontladingsbuis worden van het mengsel ionen gemaakt, die door een electrisch en magnetisch veld naar gelang van hun massa in verschillende mate worden afgebogen. Men heeft het bij deze methode tot een groote nauwkeurigheid gebracht, nl. tot fouten van slechts 0,5% in de te bepalen isotopenverhouding. Veel gemakkelijker is een analysemethode, die op dichtheidsmeting berust en die o.a. wordt gebruikt voor deuterium, het zware waterstofisotoop, waarbij dit in de vorm van „zwaar water" (D_2O) wordt toegepast. Daar men de dichtheid van water zonder al te groote moeite tot op 10^{-6} nauwkeurig kan meten — waarbij het ook van belang is, dat men water door destilleeren zoo gemakkelijk van verontreinigingen kan bevrijden — is het mogelijk om D_2O nog in uiterst groote verdunning in H_2O kwantitatief te bepalen. Bevindt zich het deuterium in andere waterstofverbindingen, dan kan men dezelfde analysemethode toepassen door de verbinding eerst te verbranden en zijn aandacht op het daarbij ontstane verbrandingswater te richten. Soms heeft men dan slechts zeer kleine hoeveelheden voor de dichtheidsmeting ter beschikking, doch dit is geen bezwaar, daar er meetmethoden zijn, waarbij men met 1/100 of zelfs 1/1000 cm^3 water kan volstaan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

48111

CLANDESTIENE RADIOPRODUCTIE IN BEZETTINGSTIJD

door ÉÉN NAMENS VELEN. 621.396.181.4„36"

Het luisteren naar buitenlandsche radiostations was ons Nederlanders door den Duitschen bezetter ten strengste verboden. Zoolang wij in het bezit van onze radio werden gelaten, zullen slechts weinigen zich hieraan hebben gestoord. Toen echter in 1943 de Duitsche autoriteiten hun bevelen kracht bijzetten door op groote schaal onze radiotoestellen in beslag te nemen, ontstond begrijpelijkerwijze veel vraag naar kleine toestelletjes die hetzij ergens in een onvindbaar hoekje verborgen, hetzij in een alledaagsch gebruiksvoorwerp gecamoufleerd konden worden. Het lag in de eerste plaats op de weg van de Philipsbedrijven in Eindhoven, aan deze vraag te voldoen. Van een normale en effectief georganiseerde productie kon natuurlijk geen sprake zijn, doch aan persoonlijk initiatief ontbrak het niet en al spoedig ontwikkelde zich in kleine werkplaatsen en privé werkkamers een groote activiteit en ondervond het ouderwetsche amateurisme van de zelfvervaardigde ontvangtoestellen een tijdelijke doch intensieve opleving.

Hoewel officieele productiestaten ontbreken en dus niemand in ons bedrijf een volledig overzicht heeft over wat er op dit gebied in Eindhoven werd gepresteerd, kan men toch schatten dat er eenige duizenden, wellicht tienduizenden, van dergelijke radioapparaatjes in zakformaat zijn vervaardigd. We willen deze typische oorlogsproductie ten behoeve van het eigen volk in dit tijdschrift niet geheel onopgemerkt voorbij laten gaan. Ofschoon wij daarbij alleen kunnen putten uit eigen ervaring en uit die van onze naaste omgeving, koesteren wij de hoop dat de hier volgende kantteekeningen een min of meer juist beeld zullen geven van de problemen, waarvoor allen zich gesteld zagen, die aan deze eenigszins riskante tak van ons bedrijf hebben deelgenomen.

Om het toestel zoo klein mogelijk te houden, werd bij voorkeur gebruik gemaakt van „knoop"- of „eikel"-buisjes. Wegens de groote gevoeligheid die in een zg. reflex-schema met slechts twee van dergelijke miniatuur-radiobuizen te bereiken is, genoot dit schema een groote populariteit. Daarbij dient de eerste buis tegelijk als versterker voor hooge frequentie en als eindbuis, terwijl de tweede buis als teruggekoppelde roosterdetector wordt gebruikt. Het laagfrequente signaal wordt van de anodezijde van deze tweede buis teruggevoerd naar het rooster van de eerste buis; het deel met lage en dat met hooge frequenties moeten in deze schakeling zorgvuldig door filters van elkaar worden gescheiden om genereeren te voorkomen. Een veel gebruikt

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

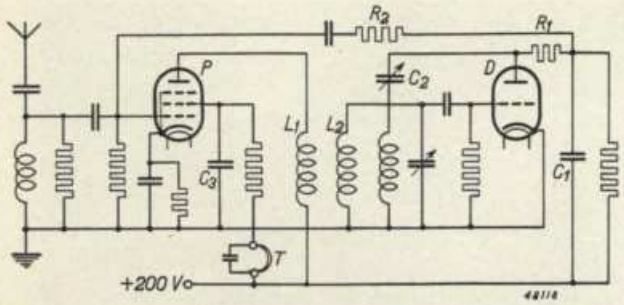


Fig. 1. Een veel gebruikt reflex-schema. De penthode P dient als versterker voor hooge frequentie en tevens als eindbuis. De anodekring is inductief gekoppeld met de triode D, welke als roosterdetector fungeert. Over een laag doorlatend filter, waartoe de elementen R_1, C_1 en R_2 behooren, wordt het laagfrequente signaal naar het stuurrooster van P teruggevoerd. Met de condensator C_2 kan de terugkoppeling worden geregeld. In de schermroosterleiding van P bevindt zich de hoofdtelefoon T. De condensator C_3 belet het optreden van hoogfrequente spanningen op het schermrooster. Door de koppeling L_1-L_2 wordt nagenoeg geen laagfrequent signaal overgedragen.

schema met toelichting is in *fig. 1* weergegeven. Met een hoofdtelefoon gaf een dergelijke schakeling reeds een goed hoorbare ontvangst op een antenne van een of twee meter lengte, in de kamer uitgespannen.

Voor een normale afstemcondensator was natuurlijk niet voldoende ruimte; in plaats daarvan werden zg. „trimmers" gebruikt met een capaciteitsvariatie van 3 tot 30 µµF (*fig. 2*). Met goed gedimensionneerde spoelen was het dan mogelijk een gebied te bestrijken, dat zoowel de 30- als de 50-meterband omvatte, zoodat men een ruime keuze had in de zenders welke men wenschte te beluisteren.

Een eveneens veel toegepast schema is dat van *fig. 3*. Hierin wordt gebruik gemaakt van de buis UCH 21, een triode-hexode. Het feit dat het triode-rooster inwendig niet met een der hexoderoosters verbonden is, maakt het mogelijk, met één buis een schakeling met roosterdetectie en laagfrequentversterking te verwezenlijken, zooals uit fig. 3 blijkt.

Ondanks het zooeven genoemde feit dat men de keus had uit een vrij groot aantal zenders, was het luisteren dikwijls verre van een onverdeeld genoegen. Juist op de korte golf hadden de Duitschers zich toegelegd op de installatie van een groot aantal stoorzenders, welke gecombineerd met het onvermijdelijke sluiereffect een goede ontvangst veelal moeilijk en dikwijls onmogelijk maakten. Dit heeft wellicht in de loop van de tijd verschillende constructeurs naar langere golven gedreven. Weliswaar kon dan slechts een klein golflengtegebied bestreken worden, doch dit werd vergoed door een meer betrouwbare ontvangst. Op de middengolf bleef vooral de „Home Service" lange tijd vrij van stoorzenders, en ook op 1500 m golflengte waren de uitzendingen, alhoewel gestoord, toch nog goed verstaanbaar. Wisselde echter de uitzending die men gewoon was te beluisteren, van golflengte, dan was een verwisseling van spoelen noodzakelijk, hetgeen met de kleine, in elkaar geknutselde apparaatjes dikwijls niet eenvoudig was.

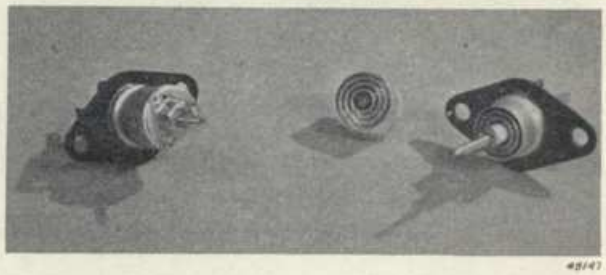


Fig. 2. Als afstemcondensator werd, om zijn kleine afmetingen, vaak een „trimmer" gebruikt (d.i. een condensator waarmede in normale radiotoestellen de capaciteit van een afgestemde kring gecorrigeerd wordt). De hier getoonde constructie (diameter 12.7 mm) is die van een schuifcondensator, waarvan de eene electrode door een schroefbeweging ten opzichte van de andere verplaatst kan worden. De capaciteit bedraagt 3-30 µµF.

Een schema als in fig. 1 of 3 weergegeven, is speciaal ontworpen voor kleine afmetingen. Wie echter zijn vooroorlogsch toestel volgens de verordening had ingeleverd en dus niet zoozeer voor een huiszoeking beducht behoefde te zijn, kon zich wat grootere afmetingen veroorloven. Zoo troffen wij in een verzameling, onlangs tentoongesteld voor leden van de staf der B.B.C., die Nederland bezochten, een tweetal met een robuust messing chassis uitgevoerde toestelletjes aan met ver-

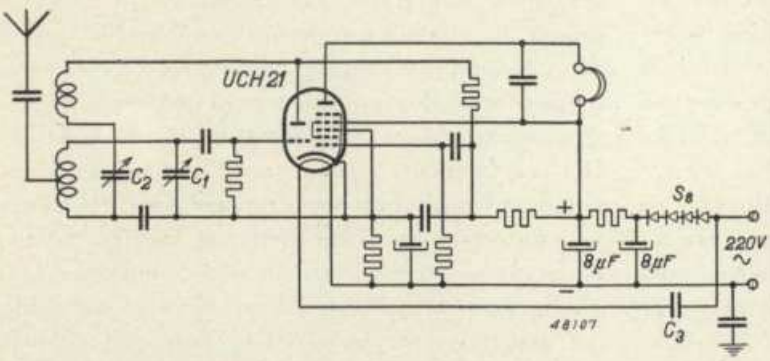


Fig. 3. Een eveneens veel gebruikt schema, waarin met één buis (UCH 21) roosterdetectie met terugkoppeling en laagfrequentversterking verwezenlijkt wordt. Met de condensator C_2 (evenals de condensator C_1 een „trimmer", zie fig. 2) wordt de terugkoppeling ingesteld. Om het gebruik van een transformator, die men zich vaak niet verschaffen kon, te vermijden, wordt de gloeidraad direct uit het wisselstroomnet gevoed onder tusschenschakeling van een condensator C_3. De netspanning wordt rechtstreeks door de seleenventielen *Se* gelijkgericht om te dienen als anodespanning.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wisselbare spoelen en twee normale buizen, EF6 en EBC3, welke op een antennedraadje van een meter de Engelsche stations op een luidspreker lieten hooren. Van dit laatste type vonden ook enkele toestelletjes hun weg naar de „Ondergrondsche" en werden er door één persoon niet minder dan 15 vervaardigd. Dit is nog geenszins het record.

Deze radio's in zakformaat waren steeds uitgevoerd voor voeding uit een 220 volt wisselstroomnet. De plaatspanning werd verkregen door de netspanning rechtstreeks gelijk te richten, hetzij met een gelijkrichtbuis van het „eikel"-type, hetzij met seleencellen die een stroom van 10 mA kunnen leveren. De afvlakking geschiedde met een electrolytische condensator, speciaal voor dit doel ontworpen, waarbij in een cylinder van 18 mm diameter en 50 mm lengte 2×8 µF was ondergebracht (fig. 3). De noodige gloeistroom werd soms door een kleine transformator geleverd, doch vaak stuitte het vervaardigen of doen vervaardigen van transformatoren op groote moeilijkheden. Men heeft dan ook wel gebruik gemaakt van een gewone gloeilamp of, beter nog, van een condensator als voorschakelimpedantie voor de gloeidraad bij directe aansluiting op het net. Vooral een buis als de UCH 21, die ontworpen is voor een bepaalde gloeistroom, leent zich hiertoe. In fig. 3 is C_3 zulk een in serie met de gloeidraad geschakelde condensator. Ook hiervoor is een speciaal type op vrij groote schaal gefabriceerd.

Het gebruik van een transformator had echter het groote voordeel dat het toestel ook gevoed kon worden uit een rijwieldynamo door deze aan te sluiten op de laagspanningskant van de transformator. De dynamo leverde dan direct de voor de gloeidraad vereischte 6 volt en de transformator voerde deze spanning op tot ongeveer 220 volt, welke waarde voor de plaatspanning verlangd werd. Na de fiets ondersteboven geplaatst te hebben, kon men dan de naast het achterwiel gemonteerde dynamo aandrijven door met de hand de trappers te draaien. Zoo hebben velen zich ook nog weten te behelpen, wanneer het stadsnet door deze of gene oorzaak stroomloos was.

Het bijeengaren van de vereischte onderdeelen was niet altijd even eenvoudig en niet zelden zal de uitvoering van het toestel min of meer zijn voorgeschreven door het materiaal dat men toevallig ter beschikking had. Zij die speciale onderdeelen onder hun hoede hadden, waren welhaast gedwongen deze goed achter slot te houden, daar zij anders moesten ervaren dat hun voorraad op onverklaarbare wijze slonk.

Vooral bij het vinden van een geschikte camouflage heeft men zijn vernuft de vrije teugel gelaten. Op een tentoonstelling van het Verzet zagen wij een toestelletje, gemonteerd in een rijwiellantaarn. Daar het glas van het voorgeschreven verduisteringsscherm was voorzien, kon men van buiten af de ware inhoud niet bespeuren. Verschillende andere voorbeelden vindt men op de foto die aan het begin van dit artikel geplaatst is. *Fig. 4, 5* en *6* laten enkele der meest origineele „oplossingen" meer in detail zien.

Uiteraard bestond de allergrootste behoefte aan

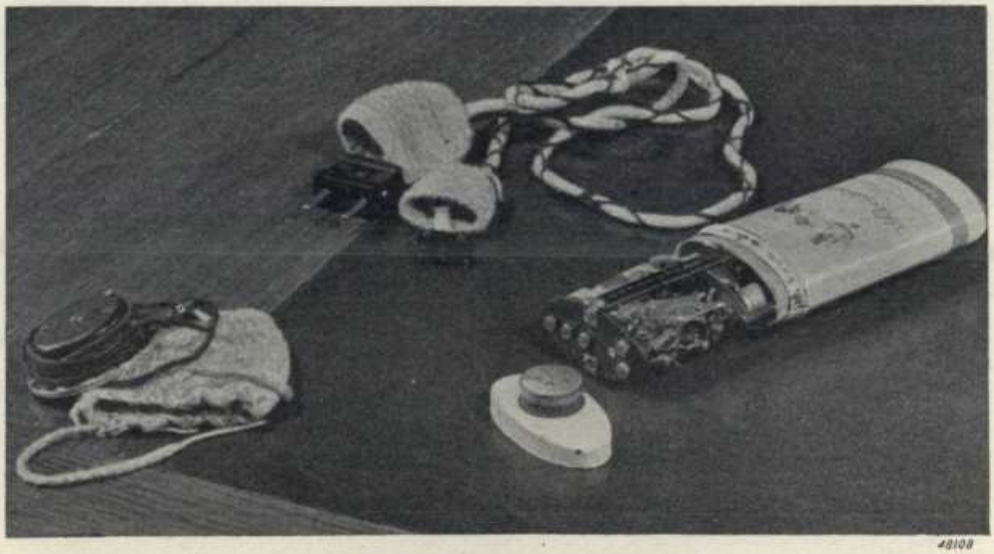


Fig. 4. Radiotoestel, gemonteerd in een poederstrooier van de baby. Het aansluitsnoer is door breiwerk gecamoufleerd als ceintuur van moeder's peignoir. De telefoon, op dezelfde wijze gecamoufleerd, werd als rammelaar in de wieg gehangen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

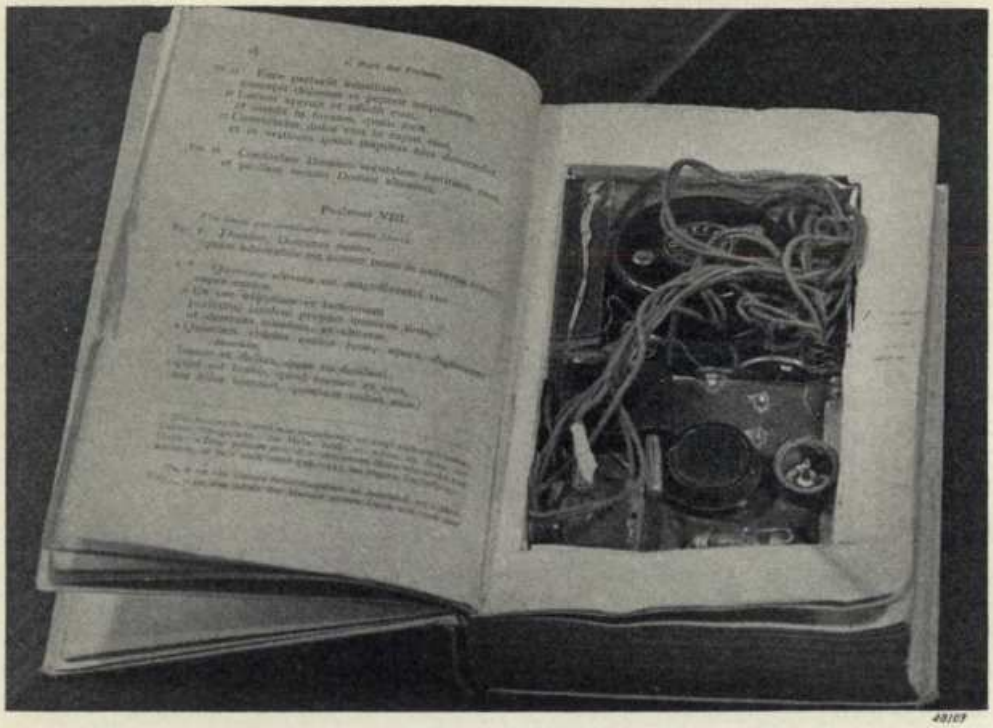


Fig. 5. Radiotoestel, verborgen in de uitgesneden bladzijden van een boek.

betrouwbaar nieuws bij hen die in Duitsche gevangenissen of kampen opgesloten waren. In het begin van 1944 werd te Eindhoven het verzoek van een Nederlandsche krijgsgevangene te Neu-Brandenburg ontvangen, hem eenige radio-onderdeelen toe te sturen, te verbergen in een levensmiddelenpakket. Er was toen reeds voldoende ervaring opgedaan met de constructie van miniatuur-toestelletjes om te kunnen besluiten, niet met de gevraagde onderdeelen te volstaan, maar den gevangene een volledig toestel, gemonteerd in een groenteblik, te zenden. Hiervoor werd de schakeling van fig. 3 gekozen. Nadat het toestel gemonteerd was, werd het gewicht tot de normale waarde van een blik groente aangevuld, zoodanig dat het zwaartepunt in het midden lag. De wanden van het blik werden van binnen zoodanig bekleed dat de klank bij bekloppen zoo goed mogelijk met die van een normaal blik overeenkwam. Groot was de vreugde toen na eenige tijd het bericht kwam dat de „voetbalschoenen" (dit was het overeengekomen codewoord in de correspondentie over het gevraagde) goed waren aangekomen en dat ze „uitstekend pasten".

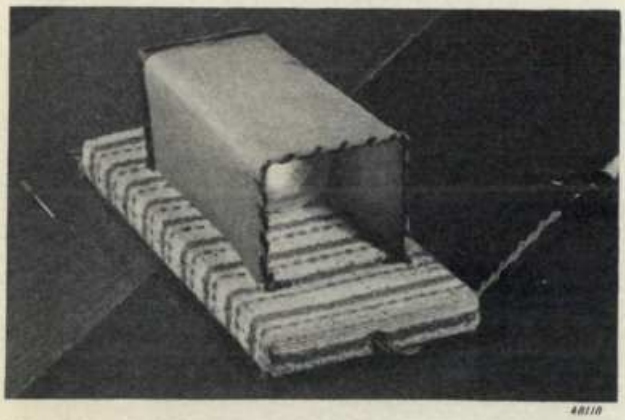


Fig. 6. De wandplaat van deze schemerlamp bevat een superheterodyne ontvanger met vijf buizen en een als luidspreker dienende telefoon. De gloeilamp rechtvaardigt het netsnoer. Om het radiotoestel in werking te stellen, moet men een spijker in een nauwelijks zichtbaar gaatje steken. Als antenne fungeert een metalen staafje (fietsspaak), dat, indien niet gebruikt, geheel naar binnen geschoven kan worden (analoog aan sommige op auto's gebruikelijke antennes).

Dat dit oorlogsbedrijf niet zonder spannende oogenblikken is geweest, behoeft geen betoog. Ook hier zijn, helaas, slachtoffers gevallen. Er staan gelukkig talrijke gevallen tegenover, waarin het gelukt is, den bezetter te slim af te zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

HET ELECTRISCH SIGNALEEREN VAN SPOREN VERGIFTIGE GASSEN IN DE ATMOSFEER

door J. BOEKE. 613.632.4:544.4

Een katalysator van fijn verdeeld platina, die een oxydatiereactie katalyseert, blijkt in deze functie belemmerd te worden door vele gassen, die ook vergiftig zijn voor het menschelijk lichaam. Op deze grondslag is een toestel ontwikkeld dat het optreden van vergiftige gassen, bijv. koolmonoxyde in mijnen, garages of stookruimten, cyaanwaterstof in galvaniseerinrichtingen enz. kan signaleeren. Het toestel bevat een platinakatalysator, aangebracht op een platinadraad, die als een der weerstandstakken in een brug volgens Wheatstone is geschakeld, en waarlangs een mengsel van methylalcohol en atmosferische lucht wordt gevoerd. De bij de oxydatie van de alcohol ontwikkelde warmte houdt de platinadraad op een temperatuur van 120-150 °C, waarbij de brug in evenwicht wordt gebracht. Bij vergiftiging van de katalysator houdt de oxydatiereactie op, de draad koelt af en door zijn weerstandsverandering raakt de brug uit evenwicht, waardoor een alarminrichting in werking treedt. Een eenvoudige draagbare uitvoering van het toestel wordt nader beschreven.

Verstikking en vergiftiging

De energie voor de levensprocessen bij mensch en dier wordt geleverd door „verbranding" van de organische verbindingen uit het voedsel: een oxydatie van de waterstof en de koolstof uit deze verbindingen door de zuurstof uit de lucht. Voor deze oxydatie is het noodzakelijk dat uit de omringende lucht door de ademhalingsorganen zuurstof kan worden opgenomen, welke door het bloed naar de verschillende organen wordt gevoerd, die zich met oxydatieprocessen bezig houden.

Zou men dus de lucht, die een dier inademt, vervangen door een gas zonder of met weinig zuurstof, bijv. alleen stikstof, of lachgas (N_2O), dan zou het dier door zuurstofgebrek tegronde gaan: stikken, of een deel van zijn levensfuncties staken: bewusteloos worden.

Elihu Thomson toonde in 1873 door proeven met de kat van de familie Thomson aan, dat men in het zoojuist genoemde geval van verstikking moet spreken, in tegenstelling met de vergiftiging die bijv. optreedt door aanwezigheid van koolmonoxyde in de atmosfeer. In het geval van verstikking herneemt het organisme bij zuurstoftoevoer (indien het leven tenminste niet volledig uitgebluscht is) weer snel zijn normale functies, terwijl in het geval van de genoemde vergiftiging de nawerking langer duurt en, ondanks zuurstoftoevoer, de dood na eenige tijd nog kan intreden.

Bij deze vergiftiging is het niet de uitwendige toevoer, maar de overdracht van de zuurstof uit de longen naar de te oxydeeren verbindingen, welke stagneert. Voor deze overdracht dienen als tusschenschakels de haemoglobine (roode bloedkleurstof) van het bloed, die met de zuurstof een gemakkelijk weer te splitsen chemische verbinding, oxyhaemoglobine, vormt en hem aldus naar de organen transporteert, en vervolgens een aantal specifieke stoffen, fermenten of enzymen genaamd. De haemoglobine verbindt zich met koolmonoxyde hechter dan met zuurstof; bij aanwezigheid van koolmonoxyde kan dus de zuurstof-bloed-verbinding niet meer gevormd worden en het zuurstoftransport door het lichaam houdt op. Op soortgelijke wijze kunnen de fermenten in het lichaam door bepaalde gassen in de ingeademde lucht onwerkzaam gemaakt worden. Hun overdragende functie wordt geblokkeerd, zij worden „vergiftigd". Daar de fermenten slechts in zeer kleine hoeveelheden aanwezig zijn, is het begrijpelijk, dat reeds sporen van een vergiftigend gas voldoende kunnen zijn om een speciale fermentfunctie, welke in de stofwisselingsketen van het organisme onmisbaar is, te blokkeeren en daardoor het geheele organisme een „dood door gebrek" te laten sterven. Van het bekende blauwzuurgas (cyaanwaterstof) is slechts 0,03 vol. % in de atmosfeer, enkele oogenblikken ingeademd, voldoende om een volwassene te dooden. Minder bekend is, dat zwavelwaterstof (de lucht van rottende eieren) even vergiftig is en feitelijk, doordat zijn werking cumulatief is, zelfs nog gevaarlijker. Door zijn uiterst sterke reuk worden wij evenwel bijtijds gewaarschuwd en kunnen wij de vergiftigde atmosfeer ontvluchten.

Helaas fungeert de neus in zeer veel andere gevallen van vergiftige gassen niet als alarmapparaat. Op gassen die normaal niet in de vrije natuur voorkomen maar gewoonlijk eerst door menschelijk toedoen ontstaan, reageert onze reukzin heel vaak niet: koolmonoxyde is voor iedereen volkomen reukeloos, cyaanwaterstof voor vele menschen. Zelfs ten opzichte van de zwavelwaterstof die wèl vaak in de natuur voorkomt, is de neus niet betrouw-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

baar: na betrekkelijk korte tijd stompt de reukzin hiervoor zoo sterk af, dat men de concentratie zou kunnen opvoeren, totdat zonder veel argwaan een doodelijke dosis zou worden ingeademd.

In de practijk doen zich velerlei gevallen voor, waarbij men kans loopt met deze of andere giftige gassen in aanraking te komen. Zoo bijv. in garages of stookruimten, waar door onvolledige verbranding koolmonoxyde kan ontstaan; in mijnen, waar eveneens koolmonoxyde kan optreden; in schilderswerkplaatsen, waar koolmonoxyde vrijkomt bij het drogen van lijnolie-houdende verf; bij het ontsmetten van scheepsruimten en huizen met cyaanwaterstofpreparaten, waarvan resten na de behandeling kunnen zijn blijven hangen; in galvaniseerinrichtingen, waar door onjuist omgaan met cyaanhoudende baden cyaanwaterstof ontwikkeld kan worden; enz. In zulke gevallen kan het vaak wenschelijk zijn om over een objectief alarmapparaat te beschikken, dat gevoelig genoeg is, om reeds op sporen van onzichtbare, min of meer reukelooze vergiftige gassen en dampen te reageeren.

Op het eerste gezicht lijkt dit een onvervulbare wensch. Hoe moet een toestel onderscheiden of een gas voor het menschelijk lichaam vergiftig zal zijn of niet? Immers, het toestel moet liefst geen niet-vergiftige gassen signaleeren.

Een oplossing van dit probleem wordt mogelijk door het feit, dat het verschijnsel van de vergiftiging in het menschelijk lichaam een ver gaande pariteit vertoont met het verschijnsel van de vergiftiging van een platina-katalysator. Een hierop gebaseerd alarmapparaat zal hier worden beschreven [1]). Voor een goed begrip is het evenwel noodig, vooraf het een en ander mede te deelen omtrent de werkingswijze van een katalysator.

Katalysatoren

Ook buiten het levende organisme kent men, naast de gewone oxydatie, de oxydatie door overdracht.

Waterstof is een gemakkelijk te oxydeeren gas; het verbrandt onder warmte-afgifte tot water. Toch vindt er bij kamertemperatuur geen verbranding plaats. Dit komt doordat tusschen de elkaar naderende moleculen waterstof en zuurstof een energiedrempel bestaat, die hen bij kamertemperatuur belet zich te verbinden. Verhoogt men de temperatuur door de vlam van een lucifer, dan verhoogt men de bewegingsenergie van een aantal moleculen voldoende om hen de energiedrempel te doen overschrijden; de vrijkomende verbrandingswarmte houdt dan de reactie verder gaande.

[1]) Nederlandsch octrooi nr. 54716, aangevraagd 23 Dec. 1939.

Er is evenwel nog een andere mogelijkheid om de oxydatie van waterstof (of van waterstof-bevattende verbindingen) aan de gang te brengen, nl. met behulp van een preparaat van fijn verdeeld platina, zg. platinazwart, waaraan waterstof en zuurstof beide worden geadsorbeerd. Het verschijnsel, dat reeds in 1823 door Döbereiner werd ontdekt, is in groote trekken als volgt te begrijpen. In de geadsorbeerde toestand is de molecuulstructuur der gassen door de krachtvelden der platina-atomen eenigszins losgewerkt, hetgeen neerkomt op een verlaging van de eerder genoemde energiedrempel, zoodat deze nu al bij kamertemperatuur kan worden overschreden en de reactie plaats vindt. Het platina zelf neemt niet aan de reactie deel, het katalyseert haar slechts. Men kan dit zoo uitdrukken dat het platina de zuurstof, die in vrije toestand niet met vrije waterstof reageert, aan de waterstof overdraagt, en men ziet dan de analogie met de organische overdragers, de fermenten, enzymen enz., die men eveneens als katalysatoren kan beschouwen. Daar het platina niet aan de reactie deelneemt, dus niet verbruikt wordt, en de geadsorbeerde moleculen na hun onderlinge reactie het oppervlak verlaten en plaats maken voor de adsorptie van nieuwe moleculen, kan een kleine hoeveelheid platina een willekeurig groote hoeveelheid gas doen reageeren, evenals bij de fermenten het geval is.

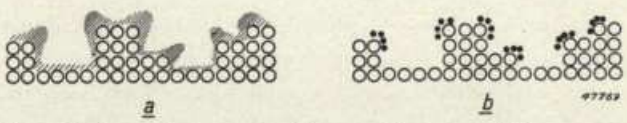


Fig. 1. Schematische voorstelling van het oppervlak van een katalysator, met gearceerd aangegeven attractievelden (*a*). Ribben en hoekpunten van kristalletjes in het oppervlak vormen actieve plaatsen, waar bij voorkeur vreemde moleculen worden geadsorbeerd (*b*).

Wordt platinazwart hoog verhit, dan gaan zijn katalytische eigenschappen verloren. Dit kan men begrijpen door de onderstelling, dat de katalyse niet gelijkmatig op het geheele platina-oppervlak gebeurt, maar op speciale „actieve" plaatsen, bijv. de ribben en hoekpunten van de kleine platina-kristalletjes aan het oppervlak [2]). Deze onderstelling strookt geheel met de verklaring der katalyse door adsorptie, daar de platina-atomen op zulke plaatsen omringd worden door minder buuratomen dan in het platte vlak en daardoor als het ware attractiekrachten overhouden om vreemde moleculen aan te trekken (zie *fig. 1*). Bij een hooge temperatuur treedt nu rekristallisatie op, de vele

[2]) Zie het verzamelwerk: E. K. Rideal en H. S. Taylor, Catalysis in theory and practice, Mac Millan & Co., London 1926.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kleine kristalletjes groeien tot enkele groote samen. Hierbij neemt het aantal ribben en hoekpunten natuurlijk sterk af, totdat het aantal actieve plaatsen te gering is om nog een katalytische werking bespeurbaar te doen zijn.

Döbereiner, die dit verschijnsel eveneens reeds kende, merkte ook op, dat sporen zwavelwaterstof, cyaanwaterstof en koolmonoxyde het platinazwart onwerkzaam maakten; de katalysator werd „vergiftigd". De verklaring hiervan is, dat de vergiftigende stoffen zeer gemakkelijk aan het platina worden geadsorbeerd. De vergifmoleculen bezetten dus de actieve plaatsen en blijven daar zitten, waardoor de katalytische functie is geblokkeerd. Daar de adsorptie een oppervlakte-effect is, is het ook duidelijk, dat reeds een zeer klein volume vergif de katalysator onwerkzaam kan maken, immers elke actieve plaats behoeft hiervoor slechts met één of enkele vergifmoleculen te worden bezet.

Voor reacties waarbij verschillende gassen betrokken zijn, heeft men in het algemeen verschillende katalysatoren, en ook de vergiften blijken min of meer specifiek te zijn. Zwavelwaterstof, een zwaar vergif voor platina, is voor nikkelsulfidekatalysatoren, die technisch gebruikt worden voor de bereiding van synthetische benzine, niet vergiftig. Zuurstof, een normale component van door platina versnelde reacties, is een sterk vergif voor de ijzerkatalysatoren in de ammoniak-synthese; enz.

Opvallend is evenwel, dat er een uitgesproken parallel bestaat tusschen de vergiftigheid van allerlei stoffen voor platina en voor de organische katalysatoren, welke in het lichaam hun rol spelen. Vergelijken we bijv. platina en katalase, een enzym, dat in de meeste lichaamsvloeistoffen, zooals bloed en melk, voorkomt. Beide stoffen kunnen o.a. fungeeren als reactieversneller bij de ontleding van waterstofperoxyde in water en zuurstof. Men heeft nu nagegaan, hoe deze katalytische functie belemmerd wordt door bepaalde „vergiften"; zie de onderstaande tabel [3]). Hierin is van een reeks vergiften het aantal grammoleculen aangegeven, noodig om de snelheid van de genoemde reactie voor een bepaald platina- resp. katalase-preparaat tot op de helft terug te brengen. Men ziet hieruit, dat platina door een heele reeks stoffen vergiftigd wordt die ook voor katalase vergiftig zijn. Koolmonoxyde is weliswaar niet vergiftig voor katalase; toch is het belangrijk, dat platina ook hiervoor gevoelig is, aangezien koolmonoxyde, zooals reeds werd vermeld, wèl vergiftig is voor haemoglobine.

[3]) Ontleend aan een artikel van W. D. Bancroft in het in noot [2]) aangehaalde boek.

Waarop de paralleliteit tusschen de vergiftiging voor platina en voor de organische katalysatoren berust, is niet met zekerheid te zeggen. Wel kan men opmerken, dat beide de eigenschap hebben, reacties waarbij zuurstof betrokken is, bij lage temperaturen te katalyseeren. De anorganische katalysatoren, welke dezelfde reacties bij hoogere temperaturen katalyseeren, zooals bepaalde oxyden, zijn voor vele van de vergiften uit het lijstje ongevoelig, waarschijnlijk doordat bij hoogere temperatuur de vergifmoleculen zelf gaan reageeren en derhalve de actieve plaatsen niet blijvend blokkeeren.

Vergif	Vergiftige concentratie (in grammoleculen)	
	voor een bepaald platina-preparaat	voor een bepaald preparaat van bloedkatalase
Sublimaat $HgCl_2$	1/2 000 000	1/2 000 000
Zwavelwaterstof H_2S . . .	1/300 000	1/1 000 000
Cyaanwaterstof HCN . .	1/20 000 000	1/1 000 000
Kwikbromide $HgBr_2$ . . .	—	1/300 000
Kwikcyanide $Hg(CN)_2$ . .	1/200 000	1/300 000
Jodiumoplossing J_2 in KJ .	1/50 000 000	1/50 000
Zoutzuurhydroxylamine NH_2OH HCl	1/25 000	1/80 000
Phenylhydrazine C_6H_5NH NH_2	—	1/20 000
Aniline $C_6H_5NH_2$	1/50 000	1/400
Arseentrioxyde As_2O_3 . .	1/50	niet vergiftig tot 1/2000
Koolmonoxyde CO	zeer vergiftig	niet vergiftig
Zoutzuur HCl	1/3000	1/100 000

Principe van het alarmapparaat

De grondgedachte van het alarmtoestel, dat steunt op de meergenoemde paralleliteit, is nu deze. Men laat een oxydatiereactie verloopen op een platinakatalysator. Hierbij komt warmte vrij. De zuurstof voor de oxydatie wordt geleverd door aangezogen atmosferische lucht. Bevat deze een vergif (hetzij als gas of damp, hetzij als nevel), dan verliest de katalysator zijn werking, de reactie houdt op en daarmee ook de warmte-ontwikkeling. De contrôle op vergiftigende stoffen in de atmosfeer is daardoor teruggebracht tot het controleeren van een warmte-ontwikkeling.

Als oxydatiereactie hebben we gekozen de oxydatie van methylalcohol. Een mengsel van methylalcoholdamp en lucht stroomt langs een laagje platinazwart, dat met een tusschenliggend laagje aluminiumoxyde op een platinadraad is aangebracht. Deze draad vormt een van de armen van een brug volgens Wheatstone (*fig. 2*). Door de oxydatiewarmte, die op de katalysator vrijkomt,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wordt de temperatuur van de platinadraad en daarmee zijn weerstand verhoogd. Men brengt de brug in evenwicht bij de eindtemperatuur, die de draad bereikt nadat de oxydatie enkele oogenblikken aan de gang is (120-150 °C). Aanwezigheid van een vergif zal onmiddellijk de temperatuur van de katalysator en zijn drager doen dalen, de brug raakt

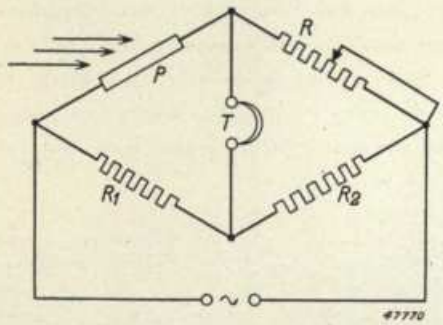


Fig. 2. Principeschakeling van het alarmtoestel. De platinadraad P draagt de katalysator (een laagje platinazwart), waarlangs een mengsel van methylalcohol en atmosferische lucht wordt geblazen. R regelbare, $R_{1,2}$ vaste brugweerstanden, T hoofdtelefoon.

uit evenwicht en er treedt een zoemtoon op in de hoofdtelefoon, die in het schema is geteekend. Natuurlijk kan men door de verstoring van het brugevenwicht via een relais ook een stel sirenes of signaallampen in werking doen treden.

Om na een alarm het toestel voor een nieuwe signaleering gereed te maken, moet de katalysator „ontgiftigd" worden. Dit wordt bewerkstelligd door korte tijd zijn temperatuur te verhoogen tot ca 400 °C, waardoor het vergif wegdampt of door reactie met het alcohol-luchtmengsel verdwijnt.

Activiteit en evenwichtstemperatuur van de katalysator

Opdat de katalysator reeds door zeer kleine hoeveelheden vergif in zijn functie belemmerd wordt, is het gewenscht, dat de activiteit van de katalysator (dwz. het aantal actieve plaatsen) klein is in verhouding tot de per tijdseenheid toegevoerde hoeveelheid reactiecomponenten. Dit beteekent, dat alle beschikbare actieve plaatsen als het ware voortdurend in touw moeten zijn om de toegevoerde overvloed van reactiecomponenten te doen reageeren. Immers, is dit niet het geval, dan zou het buiten werking treden van een zeker aantal actieve plaatsen tengevolge van bezetting door vergifmoleculen nog geen invloed behoeven te hebben op de totale hoeveelheid per tijdseenheid gevormd reactieproduct. De per tijdseenheid ontwikkelde warmte zou dan eveneens onveranderd blijven, en bij gegeven condities van de koeling (door straling en convectie) zou ook de temperatuur, die door het evenwicht tusschen ontwikkelde en afgevoerde warmte is bepaald, geen verandering behoeven te ondergaan.

De activiteit van de katalysator moet dus opzettelijk voldoende verminderd worden, zoodat hij vol belast komt te werken. Men doet dit door de katalysatordraad een tijdlang op ca 700 °C uit te gloeien. Klaarblijkelijk mag men hiermee echter slechts tot een zekere grens gaan, immers een geheel inactieve katalysator kan niet meer door een vergif bedorven worden.

Men kan deze beperking ook op een andere wijze uitdrukken. Met dalende activiteit van de katalysator moet, zooals een nadere beschouwing leert, de temperatuur waarop hij werkt steeds hooger worden, opdat de oxydatiereactie zich zelf aan de gang houdt. In het extreme geval van de activiteit nul moet de bedrijfstemperatuur eenvoudig gelijk zijn aan de normale vlamtemperatuur, waarbij de oxydatie zich zonder katalysator zelf gaande kan houden. Hieruit blijkt, dat er met toenemende evenwichtstemperatuur van de katalysator steeds minder sprake kan zijn van „vergiftiging": de paralleliteit met de gevoeligheid voor vergiften van de enzymen en fermenten, die op bloedtemperatuur werken, gaat steeds meer verdwijnen.

Een evenwichtstemperatuur van 120 à 150 °C werd het meest geschikt bevonden. Bij deze keuze speelt ook de overweging een rol, dat een niet al te lage bedrijfstemperatuur gewenscht is, om bij vergiftiging van de katalysator en afkoeling tot kamertemperatuur een behoorlijk groote ontregeling van de brugschakeling te krijgen, zoodat reeds met een heel eenvoudige en weinig gevoelige apparatuur een duidelijke indicatie kan worden verkregen.

Dat we met een afkoeling tot kamertemperatuur mogen rekenen, is als volgt in te zien. Bij een vergiftiging, d.i. vermindering van het beschikbare aantal actieve plaatsen, zal minder warmte door de reactie ontstaan. Anderzijds is, zooals werd vermeld, voor het onderhouden van de reactie bij een kleiner aantal actieve plaatsen een hoogere temperatuur noodig. Hieruit blijkt, dat zich bij een geringe vergiftiging van een volbelaste katalysator geen nieuw evenwicht kan instellen; de temperatuur valt steil tot kamertemperatuur terug.

De gewenschte evenwichtstemperatuur van 120-150 °C wordt verwezenlijkt door de katalysator zoo lang uit te gloeien, totdat hij zich in de gegeven stroom van het alcohol-luchtmengsel op die temperatuur instelt. Natuurlijk moet de toevoersnelheid der reactiecomponenten dan verder constant blijven, om de brug niet reeds zonder vergiftiging uit het evenwicht te doen geraken. De regeling van de stroomingssnelheid blijkt daarbij niet zeer critisch te zijn, daar de invloed van de snellere toevoer van reactiemengsel bij een snellere strooming ongeveer gecompenseerd wordt door de invloed van de grootere afkoeling die dan optreedt. Wel is het zaak de concentratie van alcohol in het mengsel zeer constant te houden.

Bij het in werking stellen van de katalysator komt de oxydatiereactie niet vanzelf op gang. De katalysator moet hiervoor even kunstmatig boven de te bereiken evenwichtstemperatuur worden verhit. Dit wordt op dezelfde manier gedaan als het eerder vermelde ontgiftigen.

Uitvoering in een draagbaar toestel

Een draagbaar alarmtoestel, dat volgens de beschreven principes is uitgevoerd, is in *fig. 3* weergegeven. Met het oog op de draagbaarheid moest hierbij, behalve naar een groote gevoeligheid, bedrijfszekerheid en eenvoudige bediening, ook nog naar een klein gewicht en gering energieverbruik worden gestreefd. Dit leidde tot de volgende detailoplossingen:

De katalysatordraad is, op dezelfde wijze als de metaaldraad in een gloeilamp, in een verwisselbare buis gemonteerd.

De te onderzoeken lucht wordt toegevoerd door middel van een membraanpompje. Dit bestaat uit een plat luidsprekermembraan en een hiervóór geplaatst deksel met een blaasopening. Het membraan wordt in trilling gebracht door een soort electrische bel. Dit eenvoudig samenstel blijkt als een pompje te werken met een capaciteit van ca 7 liter lucht per minuut.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Via een naaldventiel en een capillair kan methylalcohol uit een reservoir druppelen in een mengkamer, waar de alcoholdamp door de doorstroomende lucht wordt meegenomen. Een draadje in de capillair veroorlooft een fijne regeling van de

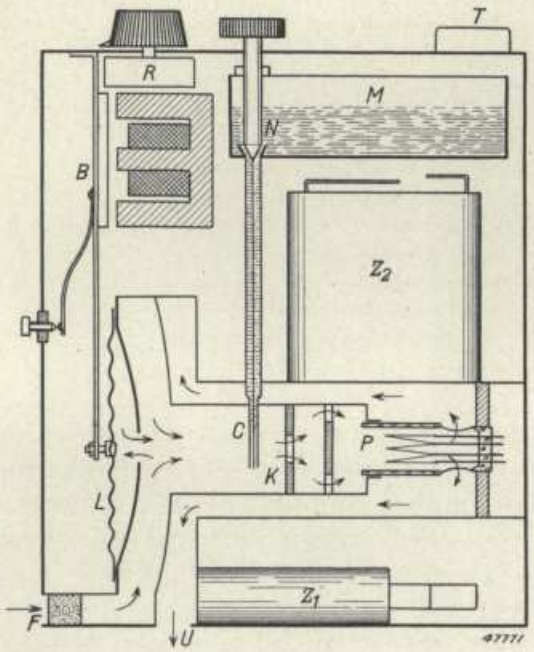


Fig. 3. Doorsnede van een draagbare uitvoering van het alarmtoestel. *P* verwisselbare „lamp" met platinakatalysator, *M* reservoir met methylalcohol, die via het naaldventiel *N* en de capillair *C* in de mengkamer *K* kan druppelen. *B* electrische bel, die het luidsprekermembraan *L* in trilling brengt, dat de via het eventueele filter *F* toestroomende lucht door de mengkamer heen blaast. De afgewerkte lucht treedt bij *U* uit het toestel. *R* regelweerstand voor het in evenwicht brengen van de brugschakeling, Z_1 zaklantaarnbatterij voor het normale bedrijf, Z_2 batterij voor het starten en ontgiftigen van de katalysator, *T* aansluiting voor de hoofdtelefoon.

alcoholtoevoer en een snelle reiniging van de capillair bij eventueel verstopt raken. De mengkamer wordt door de afgewerkte oxydatiegassen voorverwarmd; dank zij deze maatregel wordt de bedrijfstemperatuur van de katalysator weinig beïnvloed door temperatuurvariaties van de buitenlucht.

Om in de hoofdtelefoon, welke als indicator gebruikt wordt, een zoemtoon te krijgen, moet de weerstandsbrug gevoed worden met wisselspanning of intermitteerende gelijkspanning. Hiervoor wordt de spanning over de wikkeling van het electrische belsysteem gebruikt, dat de pomp aandrijft.

De weerstanden in de armen van de brug nemen energie op. Daar het energieverbruik minimaal moet zijn, werd de wikkeling van het belsysteem, waarin toch stroom moet loopen, voorzien van een middenaftakking, en beide helften werden gebruikt als vaste brugweerstanden. Bovendien is de wikkeling met behulp van een condensator in electrische resonantie gebracht met de eigen frequentie van de onderbreker van het belsysteem; zie *fig. 4*. Door deze maatregelen werd het totale energieverbruik van het apparaat teruggebracht tot 0,5 watt, hetgeen geleverd wordt door een zaklantaarnbatterij.

Draait men de regelbare weerstand voor het in evenwicht brengen van de brug geheel terug, dan sluit een schakelaar de katalysatordraad aan op een andere batterij, waardoor de draad enkele seconden met 3 watt kan worden verhit en op ca 400 °C komt, voor „starten" en „ontgiftigen".

Vóór de openingen, waardoor het pompje lucht van buiten aanzuigt, kan desgewenscht een filter worden aangebracht, dat bepaalde gassen tegenhoudt. Zoodoende kan men selectief sommige gassen aantoonen, bijv. in garages, waar altijd benzinedamp voorkomt en waar men het toestel niet hierop maar alleen op het eventueel optredende koolmonoxyde wil laten reageeren. In dit geval moet men dus een filter gebruiken, dat benzinedamp absorbeert en koolmonoxyde doorlaat.

Dat de katalysator ook door benzinedampen wordt vergiftigd, die voor het lichaam slechts weinig schadelijk zijn, is één der afwijkingen van de meergenoemde paralleliteit. Doch men kan hiervan ook nog een nuttig gebruik maken, om benzine of andere dampen te signaleeren op plaatsen waar hun optreden aanleiding zou geven tot het ontstaan

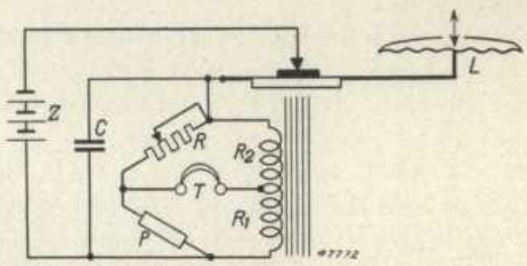


Fig. 4. Meer gedetailleerd schakelschema van het toestel. De twee helften van de bekrachtigingsspoel van het belsysteem dienen tevens als de vaste weerstanden R_1, R_2 van de brugschakeling. *Z* batterij, *C* condensator, *L* membraanpomp; overige letters als in fig. 2.

van explosieve mengsels. Een analoge toepassingsmogelijkheid berust er op, dat de katalysator gevoelig is voor het, voor den mensch weinig vergiftige, Freon en andere vluchtige gehalogeneerde koolwaterstoffen. Deze vrij kostbare gassen worden o.a. in koelinstallaties gebruikt en het beschreven toestel zou zeer geschikt zijn om lekkages in dergelijke installaties te signaleeren. Het is echter duidelijk, dat dergelijke toepassingen niets meer te maken hebben met de oorspronkelijke opzet van het apparaat en dat hiervoor wellicht ook andere, specifieke, werkingen of reacties van de desbetreffende gassen zouden kunnen worden gebruikt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE POTENTIAALVERDEELING BIJ DE ONTSTEKER VAN EEN RELAISBUIS MET KWIKKATHODE

door N. WARMOLTZ. 621.316.546.032.43:621.317.329

Ter verbetering van het inzicht in de wijze waarop een kathodevlek op kwik tot stand komt met behulp van een capacitieve ontsteker, was het gewenscht, o.a. de electrische veldsterkte aan het kwikoppervlak te kennen. In dit artikel wordt beschreven hoe deze aan een honderdvoudig vergroot model van een ontsteker in een electrolytische trog werd bepaald. De aanwezigheid van twee diëlectrica tusschen het kwik van de kathode en het geleidende deel van de ontsteker (nl. vacuum en kwarts) brengt mee dat in de electrolytische trog twee electrolyten gebruikt moeten worden. De vloeistofdichte scheidingswand hiertusschen moet geleidend zijn in de richting loodrecht op zijn oppervlak, doch isoleerend in horizontale richting langs dit oppervlak. Voor de constructie van een dergelijke anisotrope wand wordt een eenvoudige oplossing gegeven. De meetresultaten voeren, bij onderstelling van een glad kwikoppervlak, tot veldsterkten die voor koude emissie te laag zijn. Wel komt men tot een bevredigende verklaring van de waargenomen emissie, als men met Tonks aanneemt dat het kwikoppervlak door het electrische veld tot spitse puntjes kan worden uitgetrokken.

Een veel in de techniek gebruikte vorm van gasontlading is de boog [1]). Haar groote toepassing heeft deze ontlading te danken aan het vermogen, bij betrekkelijk gering spanningsverlies groote stroomen te kunnen geleiden. O.m. door deze eigenschap is het mogelijk gelijkrichters te construeeren die met een gunstig rendement werken.

De boogontladingen kunnen in enkele soorten verdeeld worden. Voor gelijkrichters en aanverwante toepassingen komen in hoofdzaak in aanmerking:

1) De thermische boog, waarbij de kathode op een zoodanige temperatuur gebracht wordt dat een thermische electronenemissie van de orde van de boogstroom optreedt;
2) de veldboog, waarbij electronen uit de kathode bevrijd worden door een electrisch veld — dat daartoe een sterkte van minstens eenige malen 10^7 V/cm moet bezitten —, veroorzaakt door de in de boog gevormde positieve ionen. Om de tegenstelling met thermische emissie te doen uitkomen, spreekt men hier gewoonlijk van koude emissie.

Met deze koude emissie nu heeft men te maken in kwikkathodegelijkrichters. De kathode is hier een kwikplas, waarbij de ontlading uitgaat van de zg. kathodevlek, d.i. een sterk lichtend gebied, waarin een hooge electronen- en ionenconcentratie bestaat en waarin de stroomdichtheid geschat wordt op gemiddeld 4000 A/cm² (de schattingen loopen echter uiteen van 1700 tot 18 000 A/cm²). Op het kwik loopt deze vlek in grillige bewegingen rond.

[1]) Zie bijv. M. J. Druyvesteyn en J. G. W. Mulder, Physische grondslagen van met gas gevulde gelijkrichters met gloeikathode, Philips techn. T. 2, 122, 1937.

Of de kwikboog een thermische dan wel een veldboog is, kan niet goed door rechtstreeksche temperatuurmetingen uitgemaakt worden wegens de vele moeilijkheden, die in dit geval aan zulke metingen verbonden zijn. Dat hij geen thermische boog kan zijn, wordt echter wel duidelijk, indien men bedenkt dat voor thermische emissie van de zooeven genoemde stroomdichtheden een temperatuur van ten minste 3500 °C noodig is; het vóórkomen van dergelijke temperaturen moet uitgesloten geacht worden wegens de reeds bij veel lagere temperatuur zeer heftige kwikverdamping. Uit de stroomdichtheid en de verdampende hoeveelheid kwik volgt voor de temperatuur der kathodevlek een waarde van 200-300 °C. Hierbij is thermische emissie geheel te verwaarloozen.

Middelen om een kathodevlek te doen ontstaan

Een kathodevlek komt niet spontaan tot stand. Om een kwikkathodegelijkrichter in werking te stellen, moet men eerst op een of andere wijze een kathodevlek doen ontstaan. Een reeds oude, maar nog steeds toegepaste methode bestaat hierin dat men een hulpstroom stuurt door de kwikkathode en een tot in dit kwik reikende ontsteekelectrode, welke vervolgens bijv. door een electromagneet of een bimetaal uit het kwik getrokken wordt. De hulpstroom wordt dan verbroken, waarbij een kathodevlek blijkt te ontstaan. Hieruit kan zich een boogontlading naar de hoofdanode(n) ontwikkelen.

Een andere ontsteekmethode, afkomstig van Cooper Hewitt, dateert reeds van 1901. Hierbij is de glazen wand van het vat waarin zich het kathodekwik bevindt, ter hoogte van de meniscus omgeven door een metalen band. Bij aanleggen van een spanning van ca 10 kV tusschen de kathode en

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de „ontsteekband" — waarbij de laatste positief moet zijn — ontstaat aan de rand van de meniscus een vonkje, dat in een kathodevlek kan overgaan [2]). Deze capacitieve ontsteking heeft, in tegenstelling met de hiervoor genoemde, met mechanische traagheid behepte, dompelontsteking het voordeel dat de ontsteking in snel tempo herhaald kan worden en op nauwkeurig vastgestelde tijdstippen tot stand komt. Een ontladingsbuis met capacitieve ontsteking heeft dus het karakter van een relaisbuis [3]), dwz. van een nagenoeg traagheidslooze schakelaar. Bovendien kan zij, dank zij de kwikkathode, zonder schade zeer groote stroomsterkten doorlaten. Deze eigenschappen zijn in het bijzonder van belang voor schakelinrichtingen die dienen voor het opwekken van stroomimpulsen van regelbare duur, tusschenruimte en amplitude. De techniek vraagt deze o.a. voor het electrisch weerstandslasschen [4]) en voor stroboscopische doeleinden. Zoo wordt bijv. in de reeds in dit tijdschrift besproken stroboscoop [5]) de in *fig. 1* geschetste buis als

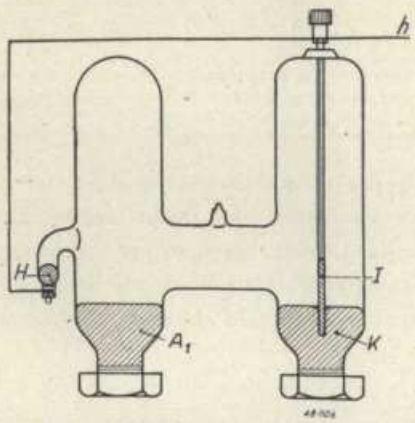


Fig. 1. Relaisbuis met capacitieve ontsteker, of vonkontsteekbuis. A_1 hoofdanode, K kwikkathode, I capacitieve ontsteker, H hulpanode, h punt waaraan een ten opzichte van K positieve spanningsstoot toegevoerd moet worden om een kathodevlek te doen ontstaan.

schakelaar gebruikt voor de lamp die de lichtflitsen geeft. Hier worden stroomstooten tot 2000 A gevraagd, bij een flitstijd van de orde van 10^{-5} sec en een frequentie tot 250 flitsen per sec. De ontsteekelectrode van de in fig. 1 weergegeven buis is een verbeterde uitvoering van de ontsteekband van Cooper Hewitt; zij bestaat uit een met kwik gevuld kwartsbuisje, dat in *fig. 2* in iets andere vorm

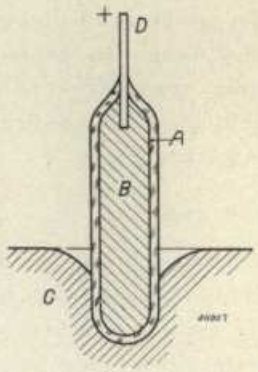


Fig. 2. Capacitieve of vonkontsteker. A isoleerende wand, B geleider, C kwikkathode, D spanningstoevoer van de ontsteker.

vergroot is voorgesteld. De werking is dezelfde als bij de ontsteekband; de verbetering bestaat voornamelijk in de grootere duurzaamheid van kwarts. De eerste oogenblikken na het ontstaan van de kathodevlek doet een hulpelectrode (fig. 1), die met dezelfde spanningsbron als de ontsteker verbonden is, dienst als anode voor de ontlading, die zich vervolgens naar de hoofdanode verder ontwikkelt. De geheele doorslag komt in zeer korte tijd tot stand (van de orde van 10^{-7} sec, gerekend van het oogenblik af waarop de kathodevlek ontstond).

Bij de bestudeering van de eigenschappen van deze ontsteker bleek het wenschelijk, de potentiaalverdeeling in de ruimte tusschen het kwikoppervlak en de buitenwand van de ontsteker (C resp. A in *fig. 3*) te kennen. Dit hangt samen met de boven reeds genoemde koude emissie van electronen uit het kwikoppervlak. Hiervoor zijn natuurlijk de electrische veldsterkte aan dit oppervlak en het potentiaalverschil, dat een electron op

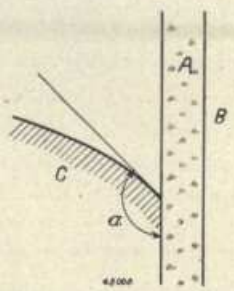


Fig. 3. Vorm van de kwikmeniscus aan de ontsteker. De letters A, B en C hebben dezelfde beteekenis als in fig. 2. α is de zg. grenshoek, waarvan de grootte voor verschillende stoffen verschillend is en die voor de combinatie kwik-kwarts 136°30′ bedroeg.

[2]) N. Warmoltz, Over het mechanisme van den capacitieven ontsteker en van den weerstand-ontsteker bij kwikdampgelijkrichters, dissertatie Delft 1946.

[3]) Er bestaat ook een andere groep relaisbuizen, nl. die met stuurrooster, waarbij de anodestroom pas ontstaan kan als de stuurroosterspanning een zekere waarde overschrijdt. De kathode kan hierbij zoowel een kwik- als een gloeikathode zijn. Toepassingen van relaisbuizen met gloeikathode zijn beschreven o.a. in het in noot [4]) aangehaalde artikel; in principe kan men daar echter ook relaisbuizen met capacitieve ontsteking toepassen. Op een vergelijking van beide systemen: relaisbuizen met stuurrooster en die met capacitieve ontsteking, kan hier niet ingegaan worden.

[4]) D. M. Duinker, Relaisbuizen als tijdschakelaars voor het naadlasschen, Philips techn. T. **1**, 11, 1936.

[5]) S. L. de Bruin, Een toestel voor stroboscopische waarneming, Philips techn. T. **8**, 25, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zijn baan in de bovengenoemde ruimte doorloopt, van groot belang. Deze beide grootheden kunnen afgeleid worden uit de potentiaalverdeeling, die wij op de hieronder beschreven wijze bepaald hebben.

Van berekening van deze potentiaalverdeeling is afgezien wegens de mathematische gecompliceerdheid van het probleem. Metingen konden ons sneller tot het doel voeren, en wel metingen aan een gelijkvormig model in een electrolytische trog, te meer daar de hiervoor benoodige apparatuur in hoofdzaak reeds aanwezig was [6]).

De electrolytische trog

Men maakt hierbij gebruik van het feit dat de potentiaalverdeeling bij een electrostatisch probleem identiek is met die van het overeenkomstige geleidingsprobleem, dwz. met het geval waarbij dezelfde electroden, met dezelfde potentiaalverschillen er tusschen, omgeven zijn door geleiders (bij voorkeur vloeibare, zooals electrolyten) in plaats van diëlectrica; de soortelijke weerstand dezer geleiders moet groot zijn ten opzichte van die der electroden. Beide gevallen worden nl. beheerscht door de vergelijking van Laplace en door dezelfde randvoorwaarden.

In een doorsnede van het geleidingsmodel — dat men vaak met voordeel als een evenredige vergrooting van het oorspronkelijke electrostatische geval kan uitvoeren — meet men de potentiaal in ieder gewenscht punt met behulp van een verplaatsbare sonde. Bij voldoend kleine afmetingen hiervan veroorzaakt deze geen noemenswaardige verstoring van de oorspronkelijke potentiaalverdeeling.

In de practische uitvoering gebruikt men een trog van isoleerend materiaal, gevuld met een zwak electrolyt, bijv. leidingwater. Hierin plaatst men het van bijv. koper vervaardigde model der electroden en legt hiertusschen spanningen aan (en wel wisselspanningen van niet te lage frequentie, ter vermijding van polarisatie aan de electroden). Met de beweegbare sonde zoekt men punten waar de potentiaal een bepaalde waarde heeft, hetgeen geconstateerd wordt met behulp van een brugschakeling. Een met de sonde gekoppelde stift teekent de overeenkomstige punten op een blad papier; de meetkundige plaats dezer punten is een der gezochte aequipotentiaallijnen.

Uitvoering van de trog met twee electrolyten

Om het model eenvoudig te houden, hebben wij de potentiaalverdeeling bij vlakke ontstekers beschouwd. De in werkelijkheid gebruikte zijn weliswaar cylindrisch, doch het ontsteekmechanisme zal bij beide vormen niet principieel verschillend zijn.

Een mogelijke uitvoeringsvorm van een vlakke ontsteker is in *fig. 4* geschetst. Een hiermee overeenkomend model is in honderdvoudige lineaire vergrooting vervaardigd voor de metingen in de electrolytische trog, welke men in *fig. 5* schematisch in bovenaanzicht ziet. Het geleidende deel van de ontsteker wordt voorgesteld door de vlakke plaat *B*,

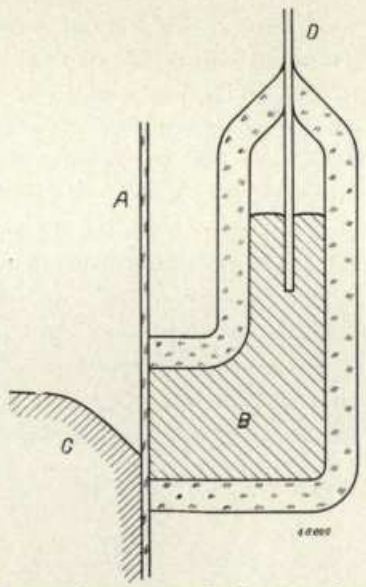


Fig. 4. Doorsnede van een vlakke ontsteker. *A* kwartsplaat, waaraan de ontsteking geschiedt, *B* binnengeleider (bijv. kwik), *C* kwikkathode, *D* spanningstoevoer.

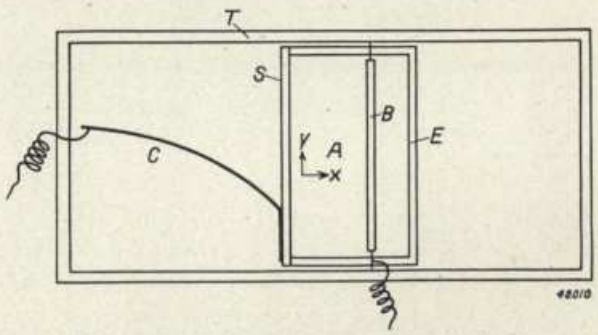


Fig. 5. Bovenaanzicht (schematisch) van een electrolytische trog (*T*) voor meting der potentiaalverdeeling aan een model van een vonkontsteker. De vlakke koperen plaat *B* en de gebogen koperen plaat *C* vormen het analogon, 100-voudig vergroot, van de binnengeleider resp. de kwikmeniscus (vgl. fig. 4). De plaat *B* bevindt zich in een bak *E*, gevuld met een oplossing van kopersulfaat; buiten deze bak bevindt zich leidingwater. De ruimte *A* beantwoordt aan de kwartsplaat *A* van fig. 4. Door evenwijdige verschuiving van de plaat *B* kan men de breedte van *A* varieeren, overeenkomende met verschillende wanddikten van de ontsteker. *S* is een anisotrope wand, die wel in de richting *X*, doch niet in de richting *Y* geleidt (zie fig. 6). De niet geteekende meetsonde is beweegbaar in de ruimten *C*-*S* en *S*-*B*. De sonde is een koperdraadje van 0,1 mm diameter, dat 1 à 2 mm buiten een isoleerend omhulsel uitsteekt.

[6]) G. Hepp, Potentiaalmetingen met behulp van de electrolytische trog, Philips techn. T. 4, 235, 1939.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

het kwikoppervlak door de volgens de meniscus gebogen plaat C, beide van koper. De met A aangegeven ruimte komt overeen met de isoleerende bekleeding van de ontsteker. Nu doet zich echter een complicatie voor, die bij de trogmetingen, beschreven in het in noot [6]) aangehaalde artikel, niet optrad. Daar had men nl. in het electrostatische geval slechts één diëlectricum (nl. vacuum) tusschen de electroden; dit kon dus bij het model in de trog vervangen worden door één electrolyt. In ons geval daarentegen zijn twee diëlectrica aanwezig: de ruimte tusschen A en C (fig. 3), waarin zich slechts kwikdamp bevindt, en de isolator A, die uit kwarts of een dergelijk materiaal bestaat. Dit brengt mee, dat in het model op de overeenkomstige plaatsen nu ook verschillende electrolyten gebruikt moeten worden, met geleidingsvermogens die zich verhouden als de diëlectrische constanten der isolatoren. Deze zijn: 1 voor vacuum (de aanwezige kwikdamp is in dit opzicht zonder beteekenis) en 4,4 voor kwarts. De met het kwarts overeenkomende plaats in de trog (A in fig. 5) moet dus met een electrolyt gevuld worden dat 4,4 maal zoo goed geleidt als het met het vacuum correspondeerende. Voor dit laatste kozen wij leidingwater, voor het eerste een oplossing van kopersulfaat. Uiteraard moeten de beide electrolyten gescheiden gehouden worden; het kopersulfaat bevindt zich dan ook in een afzonderlijke bak.

Bij de keuze van het materiaal, waarvan de wand S (fig. 5) van deze bak vervaardigd moet worden, komt men voor de volgende eigenaardige moeilijkheid te staan. Metaal komt niet in aanmerking, aangezien geleidende wanden aequipotentiaaloppervlakken zouden vormen waarvan het analogon in het electrostatische geval ontbreekt; dit zou tot een volkomen foutief beeld van de oorspronkelijke potentiaalverdeeling leiden. Maakte men echter de geheele bak van niet-geleidend materiaal, dan zou men eveneens een totaal gewijzigde potentiaalverdeeling verkrijgen: de beide electrolyten zouden dan als bekleedsels van een condensator fungeeren, met de bakwand als diëlectricum, dat nagenoeg het geheele aangelegde potentiaalverschil zou opnemen. Wat men wenscht is een constructie, waarbij de wand S (fig. 5) geleidt in de richting X, maar niet in de richting Y (hoe hij zich gedraagt in de derde richting is onverschillig), terwijl de overige wanden isoleerend moeten zijn.

Een voor de hand liggende oplossing, die aan deze schijnbaar tegenstrijdige eischen voldoet, is de volgende. Men drijft een groot aantal metalen pennen door een isoleerende plaat, zoodanig dat zij er aan weerszijden uitsteken, maar onderling geen contact maken. Deze pennen geven dan het gewenschte geleidingsvermogen in de X-richting, terwijl er in loodrecht daarop staande richtingen geen stroom kan loopen. Het maken van een dergelijke wand is echter vrij bewerkelijk. Een practischer oplossing is gevonden in de in *fig. 6* toegelichte constructie, welke bestaat uit een plaat isoleerend materiaal, die door een reeks gespatieerde U-vormige stukken blank koperdraad omvat wordt. Deze zorgen voor het benoodigde geleidingsvermogen in een richting loodrecht op het plaatoppervlak (X-richting in fig. 5). Daar de U's gespatieerd zijn, is er geen geleidingsvermogen in de lengte-(Y-)richting [7]).

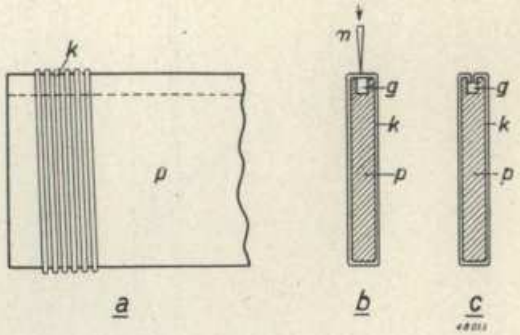


Fig. 6. Anisotrope scheidingswand der electrolyten (S in fig. 5). Een plaat p van isolatiemateriaal wordt gespatieerd bewikkeld met blank koperdraad k, fig. 6*a*. In de lengterichting bevindt zich een groef g, fig. 6*b*. Met een mes m snijdt men de windingen boven deze groef door en buigt daarbij tevens de zoo ontstane einden om de rand van de groef vast, fig. 6*c*. Aldus ontstaat een plaat die door een reeks gespatieerde U-vormige stukken blank draad omvat wordt.

Alleen in de onmiddellijke nabijheid van deze anisotrope wand doen zich de discontinuiteiten van het „traliewerk" gelden. Daarom is niet gemeten op afstanden hiervan kleiner dan de draaddikte resp. spatieering (beide 0,5 mm).

De koperen plaat B (fig. 5) is verplaatsbaar in de bak met kopersulfaat, zoodat men kan meten met verschillende breedten van de ruimte A, hetgeen overeenkomt met verschillende kwartsdikten van de ontsteker.

Meetresultaten

In de eerste plaats zijn ter contrôle enkele potentiaalverdeelingen gemeten, waarbij zich ook in de bak E (fig. 5) leidingwater bevond. Men moet hierbij verwachten, dat de aequipotentiaalvlakken aan de scheidingswand (S, fig. 5) vloeiend doorloopen. *Fig. 7* laat het meetresultaat zien voor twee wanddikten (0,35 en 3,0 mm, d.i. 3,5 en 30 cm in het model). Zooals men ziet, kan men door een evenwijdige verschuiving over de dikte van de schei-

[7]) Deze methode is eveneens toegepast door R. Stachowiack, E.T.Z. **62**, 441, 1941.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

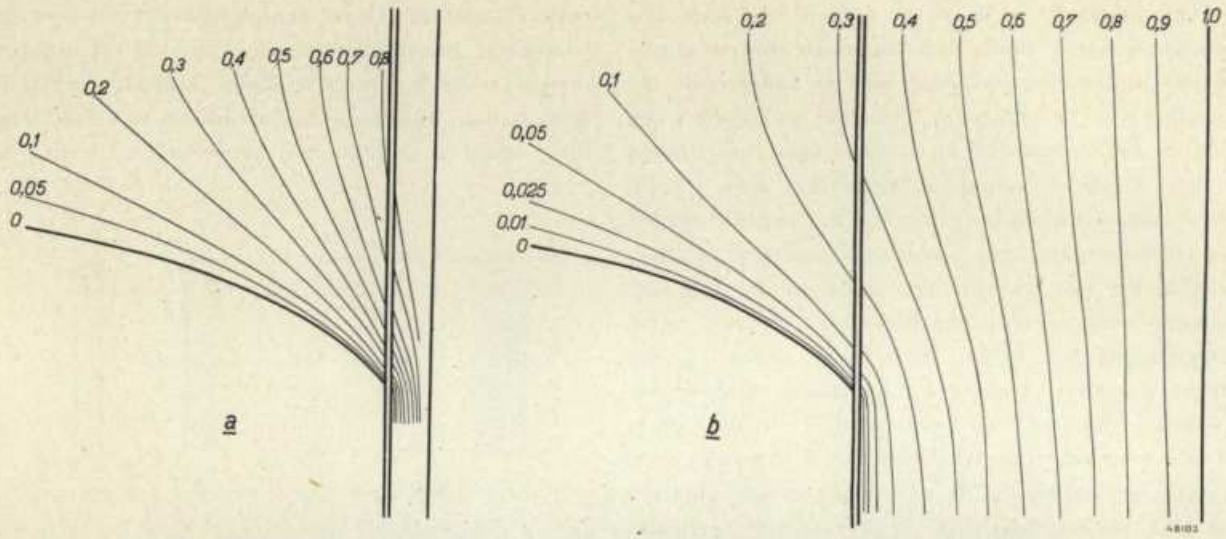


Fig. 7. Resultaat van contrôle-metingen, waarbij de bak E (fig. 5) ook met leidingwater gevuld was, overeenkomende met een denkbeeldige ontstekerwand met diëlectrische constante = 1 en een wanddikte van 0,35 mm (a) resp. 3,0 mm (b). De krommen zijn gemeten aequipotentiaallijnen, de bijgeschreven getallen geven de bijbehoorende potentiaal aan (waarbij die van de electroden C en A resp. 0 en 1 is gesteld). Denkt men zich de dikte van de scheidingswand S tot nul gereduceerd, dan loopen de aequipotentiaallijnen vloeiend door, zooals verwacht mocht worden.

dingswand S (of liever: iets meer dan deze dikte, om het gebied waar de veldverstoring der afzonderlijke „tralies" merkbaar is, uit te sluiten) de aequipotentiaallijnen nagenoeg ongestoord laten doorloopen.

Fig. 8 geeft enkele der eigenlijke metingen aan het model van de ontsteker, voor drie wanddikten (0,35, 1,0 en 3,0 mm). De waargenomen knik in de aequipotentiaallijnen strookt inderdaad met een diëlectrische constante van de ontstekerwand van ca 4,4.

De electrische krachtlijnen ondergaan aan het grensvlak van twee media met verschillende diëlectrische constante (ε_1, ε_2) een verandering van richting, en wel zoodanig dat de electrische veldsterkte aan weerszijden van het grensvlak dezelfde tangentieele component heeft, maar dat de normale componenten omgekeerd evenredig met de diëlectrische constanten zijn. Hieruit volgt voor de richtingsverandering der krachtlijnen (vgl. *fig. 9*):

$$\frac{\operatorname{tg}\beta_1}{\operatorname{tg}\beta_2} = \frac{N_1Q_1/P_1N_1}{N_2Q_2/P_2N_2} = \frac{1/P_1N_1}{1/P_2N_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

Voor de aequipotentiaallijnen, die de krachtlijnen loodrecht snijden, geldt derhalve

$$\frac{\operatorname{tg}\gamma_1}{\operatorname{tg}\gamma_2} = \frac{\operatorname{cotg}\beta_1}{\operatorname{cotg}\beta_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1},$$

als γ_1 resp. γ_2 de hoeken zijn die de aequipotentiaallijnen met de normaal op het grensvlak vormen.

Door in deze figuren de krachtlijnen te teekenen en daarlangs de afstanden der aequipotentiaalvlakken te meten, kan men de electrische veldsterkte bepalen. Om de veldsterkte aan het kwikoppervlak te

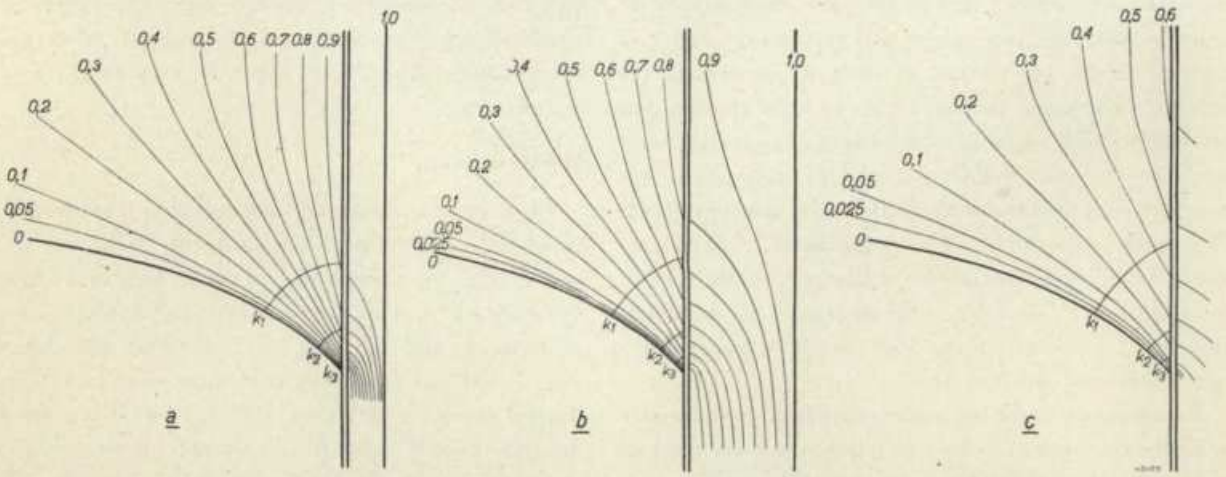


Fig. 8. Eenige gemeten potentiaalverdeelingen aan een vlakke ontsteker, waarvan de wand een diëlectrische constante 4,4 en een dikte (a) 0,35 mm, (b) 1,0 mm, (c) 3,0 mm heeft; k_1, k_2, k_3 zijn eenige krachtlijnen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vinden zijn enkele aequipotentiaalvlakken die dicht langs de electrode C loopen, nog eens nauwkeurig nagemeten.

Hierbij bleek, zooals wel bekend is, dat een uiterste zuiverheid van de electroden noodzakelijk is.

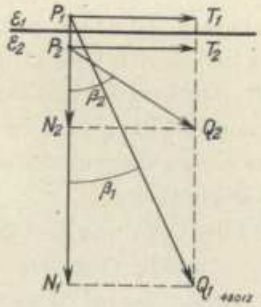


Fig. 9. P_1 en P_2 zijn punten aan weerszijden van het grensvlak tusschen media met verschillende diëlectrische constante (ε_1, ε_2). De electrische veldsterkte (P_1Q_1, P_2Q_2) in deze punten heeft dezelfde tangentieele component ($P_1T_1 = P_2T_2$), maar de normale componenten zijn omgekeerd evenredig met de diëlectrische constanten ($P_1N_1 : P_2N_2 = \varepsilon_2 : \varepsilon_1$). Hieruit volgt de aan het grensvlak optredende richtingsverandering der krachtlijnen, en eveneens die der aequipotentiaallijnen, welke de krachtlijnen loodrecht snijden.

In dit geval neemt de sonde de potentiaal van de electrode aan als zij deze juist raakt. Bij onvoldoende reiniging blijft men steeds een potentiaalverschil tusschen sonde en electrode meten, veroorzaakt door een minder goed geleidende oppervlaktelaag. Het bleek dat een dagelijksche reiniging van de electroden en van de scheidingswand met sterk zwavelzuur noodzakelijk was.

Fig. 10 toont enkele van de resultaten der veldsterktebepaling aan het kwikoppervlak, bij wanddikten van 0,35, 1,0 en 3,0 mm. Uitgezet is hier $1/F$ (waarbij F in kV/cm is uitgedrukt) als functie van de hoogte boven de grenslijn kwik-ontstekerwand. Aangezien men aan deze grenslijn door de discontinuïteit, veroorzaakt door de grenshoek, een oneindig hooge veldsterkte verwacht, is de kromme voor $1/F$ naar nul doorgetrokken.

Mechanisme van de ontsteking

Ter toelichting van het hiermede verkregen inzicht in het mechanisme van de ontsteker zullen we het ontsteekproces iets nader beschouwen.

Door directe waarneming is gebleken dat de vonk ontstaat op een hoogte boven de grenslijn kwik-ontstekerwand, die bij gegeven dikte en materiaal van de wand alleen door de spanning op de ontsteker bepaald is. Zoo vonden wij bijv. bij een wanddikte van 0,35 mm voor deze beide grootheden de volgende waarden:

3,15 kV	0,21 mm
3,55 „	0,065 „
4,5 „	0,025 „ .

Bij deze spanningen volgt uit fig. 10, kromme a, voor de veldsterkte op die plaatsen: 94,5, 255 en 750 kV/cm.

De vraag is nu of men met deze veldsterkten koude electronenemissie kan verwachten. R. Haefer heeft de hiervoor benoodigde veldsterkte bepaald aan wolfraampunten, die ultramicroscopisch op gladheid van oppervlak gecontroleerd waren [8]). In overeenstemming met wat men theoretisch kan afleiden, vond hij dat voor een stroomdichtheid van 45 A/cm² een veldsterkte van $3 \cdot 10^4$ kV/cm vereischt is, en dat men nog slechts $3 \cdot 10^{-16}$ A/cm² mag verwachten bij 10^4 kV/cm. Hetzelfde geldt voor kwik, waarvan de uittreedarbeid nagenoeg dezelfde is als die van wolfraam. De in ons geval optredende veldsterkten van 10^2-10^3 kV/cm kunnen dus geen noemenswaardige koude emissie veroorzaken.

De volgende twee punten vragen nu om een verklaring:

1) Hoe kan op de waargenomen plaats koude emissie optreden, hoewel de uit de metingen afgeleide veldsterkte daarvoor te gering is?
2) Waarom ontstaat de vonk niet dieper in de spleet tusschen meniscus en kwartswand, waar de veldsterkte hooger is?

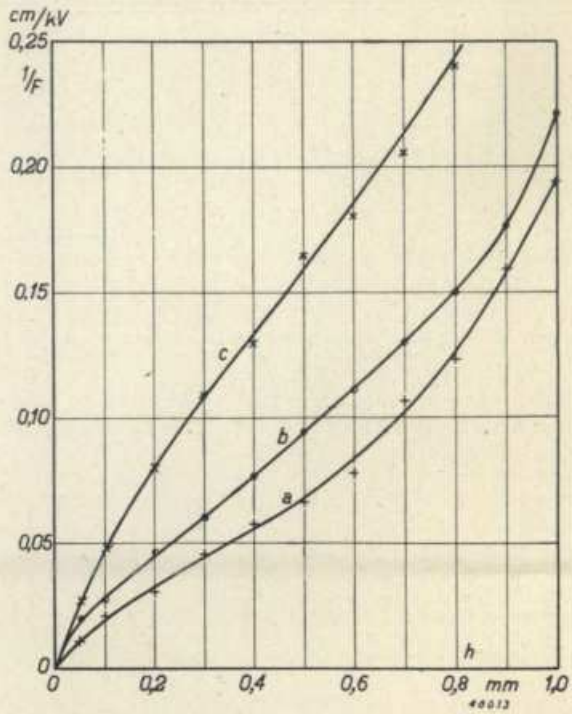


Fig. 10. Veldsterkte F aan het kwikoppervlak bij een spanning van 1 kV op de ontsteker. Uitgezet is $1/F$ (F in kV/cm) als functie van de hoogte h boven de grenslijn kwik-kwarts, waarop de ontsteking plaats vindt (om beter naar kleine waarden van h te kunnen extrapoleeren, is niet F, maar $1/F$ uitgezet). De krommen a, b en c gelden weer voor wanddikten van resp. 0,35 mm, 1,0 mm en 3,0 mm.

[8]) R. Haefer, Z. Phys. **116**, 604, 1940.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het antwoord op de laatste vraag zou hier te ver voeren; volstaan zij met de opmerking dat er dieper in de spleet inderdaad eenige ontlading is waar te nemen, doch dat deze zich niet tot een kathodevlek kan ontwikkelen; het door de geëmitteerde electronen doorloopen potentiaalverschil is daarvoor te gering.

Wat het eerstgenoemde punt betreft, is het, mede op grond van ons verdere onderzoek aan ontstekers, zeer waarschijnlijk gebleken dat een reeds door Tonks [9]) theoretisch beschouwd mechanisme de verklaring brengt. Het kwikoppervlak is niet volkomen glad, maar er komen microscopisch kleine heuvels op voor, die volgens Tonks door het electrische veld tot zoodanig spitse puntjes kunnen worden uitgetrokken dat hieraan een voor koude emissie voldoend groote veldsterkte optreedt. De heuvels worden veroorzaakt door de warmtebeweging en worden bij afwezigheid van een electrisch veld door de oppervlaktespanning betrekkelijk vlak gehouden.

In het kort geschetst komt het geheele proces dus op het volgende neer:

Bij spanningstoevoer aan de ontsteker trekt het electrische veld de oorspronkelijk vlakke heuvels op het kwikoppervlak tot spitse punten uit, waaraan de veldsterkte waarden bereikt bij welke koude emissie optreedt. De uittredende electronenstroom vloeit de eerste oogenblikken naar de ontstekerwand en ontwikkelt zich dan door ionisatie van de kwikdamp tot een boogontlading.

Het blijkt dat de tijden, die volgens de berekening van Tonks noodig zijn om de heuvels tot punten uit te trekken, bij de veldsterkten die uit de boven beschreven metingen in de electrolytische trog volgen, goed in overeenstemming zijn met de door ons gemeten ontsteekvertragingen. Deze vormen dus een bevestiging van de theorie van Tonks.

[9]) L. Tonks, Phys. Rev. **48**, 562, 1935.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!